

Periodical Part, Published Version

Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau (Hg.)

Schriftenreihe Wasser- und Grundbau Heft 17

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105734>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau (Hg.) (1967): Schriftenreihe Wasser- und Grundbau Heft 17. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau (Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, 17).

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin

Herausgegeben vom Direktor

L	110	120	210	220
Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe				
Eing. 15 SEP. 1967				
Tgb. Nr. _____ Anl. _____				
010	310	320	410	420

Schriftenreihe

Wasser- und Grundbau

Heft 17



BERLIN 1967

0.11

6311

Bücher-Verzeichnis
№ 6311

Mitteilungen der Forschungsanstalt
für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin
Herausgegeben vom Direktor

=====

Schriftenreihe
"WASSER- UND GRUNDBAU"

Heft 17

Berlin 1967

BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU
KARLSRUHE
BÜCHEREI

Redaktion
Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau
1017 Berlin, Alt-Stralau 44-45
Deutsche Demokratische Republik

Alle Rechte vorbehalten

Ag 130/23/67 A III/18/6

I n h a l t

1) GLAZIK, G. POHL, H.	Modellversuche über den Quer- stapellauf teilausgerüsteter Hochseefischereischiffe	5 - 62
2) GLAZIK, G. BURGER, W.	Experimentelle Untersuchungen über die Absonderung von Phenol aus bituminösen Uferbefestigungen	63 - 95
...	Inhalt der Hefte 1 - 16	97 - 100



2/ DK 629.128.2

Hellinge

Modellversuche

Modellversuche über den Querstapellauf
teilausgerüsteter Hochseefischereischiffe

Dipl.-Ing. Günter G l a z i k und

Dipl.-Ing. Herbert P o h l

Gliederung

1. Allgemeines zur Praxis des Querstapellaufs
2. Aufgabenstellung für die Modellversuche
3. Analyse des Querstapellauf-Prozesses
4. Probleme der modellmässigen Nachbildung des Querstapellauf-Prozesses
5. Modellaufbau und Methodik der Modellversuche
6. Versuchsergebnisse
 - 6.1 Allgemeines
 - 6.2 Neigung der Ablaufbahn
 - 6.3 Ablaufgeschwindigkeit
 - 6.4 Rollwinkel
 - 6.5 Tauchtiefe
 - 6.6 Auslaufweg
 - 6.7 Schwallwelle
 - 6.8 Kräfte an der Hellingkante
7. Schlussbemerkungen

Literaturverzeichnis

1. Allgemeines zur Praxis des Querstapellaufs

In der Praxis der Schiffswerften hat in den letzten Jahrzehnten in zunehmendem Masse der Querstapellauf Anwendung gefunden. Er wird auf immer grössere Schiffe (z.Z. bis zu rd. 30000 tdw) ausgedehnt. Die weitere Verbreitung dieser Methode resultiert aus bestimmten ökonomischen Vorteilen gegenüber dem Längsstapellauf. Als Vorzüge sind zu nennen:

- a) Möglichkeit des Baues des Schiffes auf ebenem Kiel bzw. in horizontaler Stellung, was die Montagetechnologie wesentlich vereinfacht. Dieser Vorteil kommt insbesondere bei der Sektionsbauweise zur Geltung.
- b) Relativ leichte Helling- und Kaikonstruktionen.
- c) Vermeidung kostspieliger (und z.T. nicht ausreichend kontrollierbarer) Unterwasserarbeiten bei Bau und Unterhaltung der Helling sowie bei der Stapellaufvorbereitung.
- d) Ausschaltung der Längsbiegung des Schiffsrumpfes.
- e) Raumeinsparung auf dem Werftgelände, insbesondere aber bezüglich der Wasserfläche.
- f) Fortfall von Bremseinrichtungen.

Die genannten Vorteile sind teilweise zugleich sowohl ökonomischer als auch technischer Art. Für Werften an schmalen Gewässern ergibt sich zwangsläufig der Querstapellauf.

Die Methode des Querstapellaufs bringt aber auch einige neue Probleme mit sich. So kann z.B. infolge der günstigeren Festigkeitsverhältnisse des Schiffes ein Abkippen um die Unterkante der Ablaufbahn zugelassen werden, während dies beim Längsablauf bekanntlich strikt zu vermeiden ist. Schon allein dieser Vorgang wirft verschiedene nicht von vornherein theoretisch überschaubare Fragen auf. Wenn sich zwar allgemein der Querablauf einfacher gestaltet als der Längsablauf, so erfordert zur Vermeidung von Havarien doch auch der Querstapellauf eine gute Vorbereitung. Als mögliche Komplikationen, welche durch entsprechende Vorarbeiten auszuschliessen sind, müssen berücksichtigt werden:

- a) Stehenbleiben des Schiffes infolge Geschwindigkeitsverlust oder

Verkleben der Schlitten auf den Ablaufbahnen.

- b) Verkanten Bug - Heck, d.h. nichtparalleles Ablaufen, beim Freikommen des Komplexes Schiff und Schlitten von der Hellingkante mit der Gefahr der Beschädigung sowohl der Helling- und Kaianlagen als auch des Schiffes.
- c) Aufstossen der Schlitten oder des Kiels auf der Sohle des Wasserbeckens.
- d) Übermässige Krängung des Schiffes beim Eintauchen ins Wasser, welche zum Kentern führen kann.
- e) Anschlagen des Schiffes gegen die Kaikante beim Rückschlingern.

Durch zahlreichere in den letzten Jahren und in verschiedenen Ländern erfolgte Einzeluntersuchungen konnten bereits Voraussetzungen für die sichere Durchführung von Querstapelläufen unter unterschiedlichen Bedingungen geschaffen werden. U.a. beruht die zunehmende Anwendung des Querstapellaufs darauf, dass durch die bisherigen Erfahrungen und wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse immer mehr Vertrauen zu dieser Stapellaufmethode gewonnen wurde.

2. Aufgabenstellung für die Modellversuche

In vielen Werften, welche überwiegend kleinere Schiffe bauten, wurden die Querstapelläufe bisher ohne jegliche Berechnungen oder anderweitige Voruntersuchungen durchgeführt. Wie bereits hervorgehoben, erfordert jedoch die Ausweitung des Querablaufs auf grössere Schiffe zur Gewährleistung eines sicheren Stapellaufs auf exakten Grundlagen beruhende Vorbereitungen. Im Gegensatz zum Längsstapellauf liegen für den Querablauf bisher keine ausreichenden theoretischen Berechnungsverfahren vor; die Literatur über den Querstapellauf hat, insbesondere auch in Deutschland, nur geringen Umfang. Von verschiedenen Seiten wurde allerdings in den letzten Jahren die Ausarbeitung solcher Verfahren in Angriff genommen. Die komplizierten dynamischen Verhältnisse beim Querablauf hatten jedoch zur Folge, dass durch diese Berechnungen der Vorgang nicht in allen Einzelheiten erfasst werden konnte. Wegen dieser Schwierigkeiten hat es sich eingebürgert, die im speziellen Fall auftretenden Probleme durch hydraulische Modellversuche zu lösen.

Den in der vorliegenden Arbeit behandelten Modellversuchen liegt folgende Aufgabenstellung zu Grunde:

Für die Elbe-Werft Boizenburg ist eine Rekonstruktion unter Berücksichtigung der Fertigung auf einer Taktstrasse vorgesehen; der letzte Hellingtakt besteht in der Vorbereitung und Durchführung des Querstapellaufs. Auch z.Z. werden die auf der Werft gefertigten Schiffe bereits im Querablauf zu Wasser gebracht. Dabei schliesst sich an eine geneigte Ablaufbahn ein gekrümmtes Bahnstück an, welches fast bis zum niedrigsten für einen Stapellauf in Frage kommenden Wasserstand herabgeführt ist. Im Zuge der Rekonstruktion ist ein Umbau der Querhelling vorgesehen, welcher sich in die allgemeine Anordnung der Taktstrasse einfügt. Dabei ist es infolge des sehr schmalen Werftgeländes sowie der geringen Hafenbreite nicht möglich, die Ablaufbahnen soweit ins Wasser vorzuziehen, dass beim Stapellauf ein Freischwimmen des Schiffes von den Bahnen erfolgt. Als Alternativlösung wurde der Bau einer Schiffsabsenkanlage erwogen. Mit Rücksicht auf die dafür erforderlichen hohen Aufwendungen wurde dieser Gedanke aber wieder fallengelassen. Wesentlich billiger stellt sich eine Querhelling, bei welcher die Hellingkante in der Flucht der anschliessenden Kaianlage liegt. Den Abschluss der Helling soll ein Spundwandbauwerk bilden. Die Ablaufbahnen enden dann ebenfalls an der Hellingkante, so dass die Schiffe beim Stapellauf dort abkippen und je nach Wasserstand mehr oder weniger tief frei von der Helling fallen. Als weitere neue Gesichtspunkte gegenüber der bisherigen Stapellauftechnologie kommen hinzu, dass die künftig zu bauenden und zu Wasser zu lassenden Schiffe grösser und bereits vor dem Stapellauf teilweise ausgerüstet (Maschinenanlagen) sind. Als Schiffstypen sind vorgesehen Frosttrawler, Strömlingsfänger und Schiffe ähnlicher Grössenordnung.

Bei der Werft lagen bisher keine Erfahrungen über das Verhalten derartiger, ausgerüsteter Schiffe beim Querstapellauf vor und auch keine Kenntnisse über die unter den gegebenen Bedingungen für einen sicheren Stapellauf notwendige Ausbildung der Helling mit den Ablaufbahnen. Eine in Zusammenarbeit mit dem Institut für Schiffbau (Technologische Projektierungsgruppe) Rostock erfolgte Auswertung der Fachliteratur führte ebenfalls zu keinen endgültigen

Ergebnissen. Daher erteilte das Institut für Schiffbau der Forschungsanstalt den Auftrag, hydraulische Modellversuche über das Zuwasserbringen von teilausgerüsteten Frosttrawlern von der Querhelling durchzuführen. Dabei sollten folgende Fragen geklärt werden:

- a) Wie verhält sich das zu 50 und 70 % ausgerüstete Schiff beim Querstapellauf?
- b) Welche Geschwindigkeiten erreicht das Schiff am Endpunkt der Ablaufbahn?
- c) Welches ist die zweckmässigste Neigung der Ablaufbahn?
- d) Welche max. Tauchtiefen werden beim Eintauchen des Schiffes in das Wasser erreicht?
- e) Welcher Rollwinkel tritt wasser- und landseitig beim eingetauchten Schiff auf?
- f) Welche Schwallwelle entsteht am gegenüberliegenden Ufer?
- g) Welche max. Hafenbreite wird für den Stapellauf benötigt (Auslaufweg des Schiffes nach Eintauchen in das Wasser)?
- h) Welche senkrechten Lasten treten beim Stapellauf an der Kai-kante auf?

3. Analyse des Querstapellauf-Prozesses

Als Grundlage für die Planung und Vorbereitung der Modellversuche wurde von uns an Hand bereits vorliegender Untersuchungsergebnisse sowie theoretischer Überlegungen eine allgemeine Analyse des Querstapellauf-Prozesses durchgeführt.

Abb. 1 veranschaulicht vier verschiedene Phasen des Querstapellaufs mit den dabei auftretenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhältnissen. Wenn der Wasserspiegel unterhalb der Hellingkante liegt, wirkt während des Ablaufs auf der Helling kein hydrodynamischer Widerstand; die Phase I reicht dann vom Beginn der Bewegung bis zur Hellingkante, während die darauffolgende Phase den freien Fall des Schiffes bis zum Auftreffen auf die Wasseroberfläche beinhaltet. Bei noch höheren Wasserständen ist es dagegen möglich, dass die Phasen III und IV entfallen, d.h., dass das Schiff

bereits vor Erreichen der Hellingkante frei aufschwimmt. Abgesehen von diesem Fall, muss die Geschwindigkeit des Schiffes beim Verlassen der Hellingkante stets so gross sein, dass es ohne Gefahr einer Havarie vom Kai freikommt. Das betrifft einmal das Erreichen eines genügenden Abstandes von der Kaikante, zum anderen werden mit zunehmender Geschwindigkeit die Rollwinkel kleiner und somit die Stabilitätsverhältnisse besser. Während von diesen Gesichtspunkten her die Ablaufgeschwindigkeit möglichst gross sein soll, muss sie auf Grund anderer Forderungen in bestimmten Grenzen bleiben. Die infolge der Ablaufgeschwindigkeit eintretende Erhitzung der auf den Gleitflächen aufgetragenen Schmiere darf den zulässigen Wert nicht überschreiten, um das Festfahren der Schlitten zu vermeiden. Ferner muss die Geschwindigkeit begrenzt bleiben, um Verformungen des Schiffsrumpfes u.ä. beim Aufprall auf das Wasser auszuschliessen. Die in diesem Sinne in der Literatur empfohlenen Grenzen betragen 5 bis 8 m/s [4]. PIENKAWA nimmt als oberen Grenzwert für voll ausgerüstete Schiffe 6 m/s und für leere Schiffsrumpfe 7 m/s an [8].

Nach den allgemeinen Regeln der Mechanik gilt für die gleichförmig beschleunigte Bewegung auf den Ablaufbahnen, ohne Berücksichtigung des Wasserwiderstandes^{+) :}

$$v_s = \sqrt{2 g s (\tan \alpha - \mu)} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

v_s = Geschwindigkeit nach Zurücklegen des Ablaufweges s

($v_s = v_{\max}$ = Endgeschwindigkeit; $v_m = \frac{s}{t} = \frac{v_s}{2}$)

$\tan \alpha$ = Bahnneigung

μ = Reibungskoeffizient der Bewegung

^{+) Hydrodynamische Widerstandsbeiwerte für den Fall der Queranströmung wurden u.a. von LATES für verschiedene Schiffstypen experimentell ermittelt [6].}

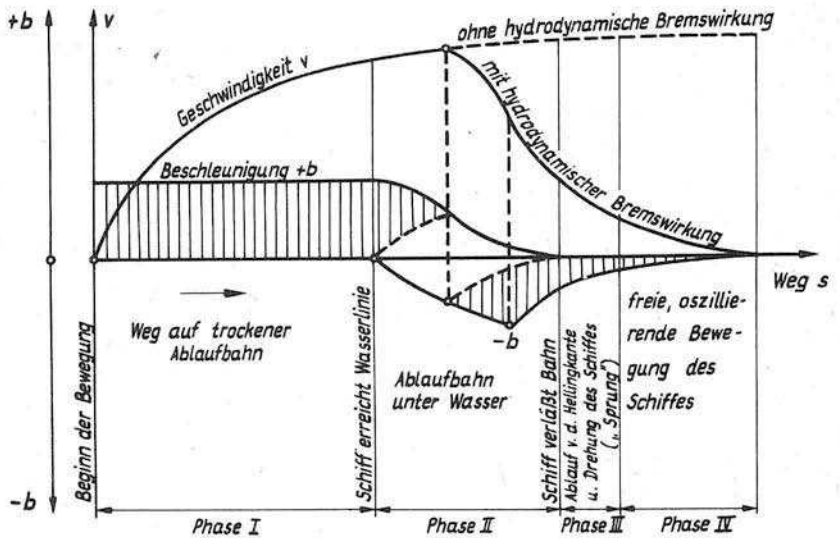
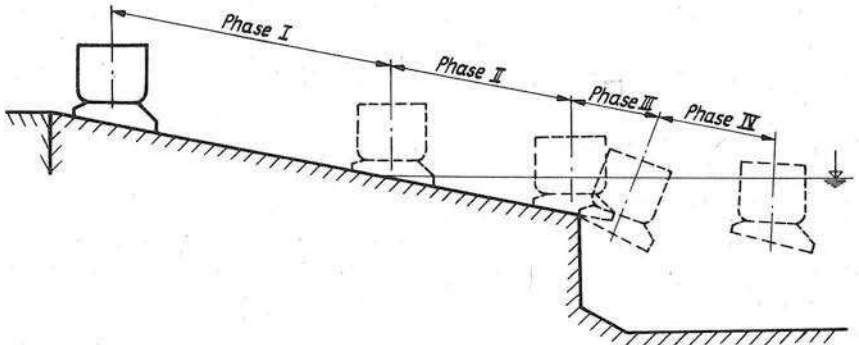
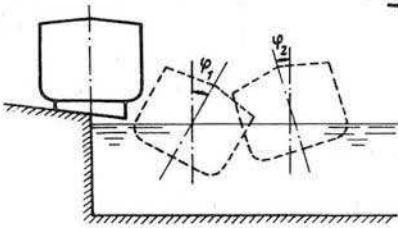


Abb. 1

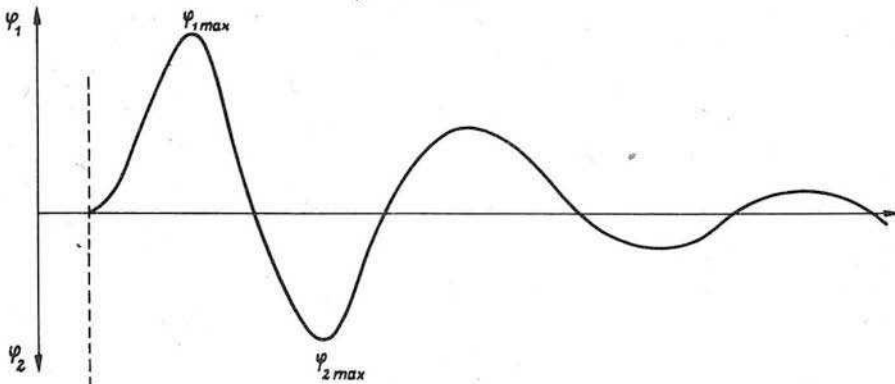
Phasen des Querstapellaufs bei unter Wasser liegender Vorhelling

(Sofern der Wasserspiegel unterhalb der Hellingkante liegt,
wird die Phase III durch den freien Fall des Schiffes modifiziert)



Definitionsskizze
f. d. Rollwinkel

a) Rollwinkel



b) Tiefertauchung gegenüber freidriftendem Zustand

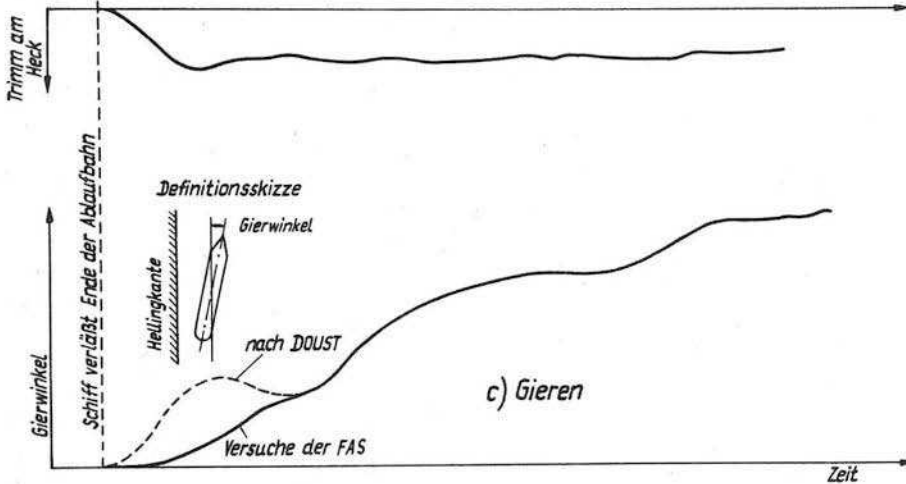


Abb. 2

Typischer Ablauf der Vorgänge beim Querstapellauf
in Abhängigkeit von der Zeit

Auf Abb. 2 wurde der typische Ablauf einiger für den Erfolg des Querstapellaufs entscheidender Vorgänge in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. In dem Augenblick, wo der Schwerpunkt des Komplexes Schiff - Schlitten über die Senkrechte der Kaikante hinweggeht, beginnt die Drehung des Komplexes um die Kante der Ablaufbahn; das Schiff beschreibt beim "Sprung" von der Kaikante eine ballistische Kurve (Wurfparabel). Dabei tritt der wasserseitige Rollwinkel $\varphi_1 \text{ max}$ auf, auch Aussenkrängungswinkel genannt, welcher über die Stabilität des Schiffes entscheidet. Der Verlauf der Rollwinkel entspricht einer gedämpften Schwingung (s. Abb. 2a). Daher ist der Rückschlingerwinkel $\varphi_2 \text{ max} < \varphi_1 \text{ max}$. Seine Grösse in Verbindung mit der Entfernung des Schiffes von der Kaikante bei seinem Auftreten ist massgebend für die Beantwortung der Frage, ob der Schiffsrumpf beim Zurückschlingern gegen die Kaikante schlagen wird.

Eine weitere für das Gelingen des Querablaufs ausschlaggebende Erscheinung ist das gegenseitige Verdrehen bzw. Verkanten der Schiffsenden, welches bei der Schiffsbewegung im Wasser als Gieren bezeichnet wird (s. Abb. 2c). In der einschlägigen Literatur wird sehr eindringlich auf die Gefahr des Verkantens und Festzwängens der Schlitten während des Ablaufs auf den Bahnen hingewiesen. Diesem Übel kann durch Anordnung entsprechender Führungen (evtl. muldenförmige Bahnen) entgegengetreten werden. Besonders gefährlich kann sich das Verkanten auswirken, wenn das Schiff mit einem der Enden zuerst von der Hellingkante fällt, wodurch Zerstörungen sowohl des Schiffes als auch der Helling hervorgerufen werden können. Dieses Risiko besteht besonders bei Schiffen mit grossen Verhältnissen $L : H$ und $B : H$ [10]. Einfluss auf das Verkanten hat neben einem ungleichmässigen Inbewegungsetzen des Schiffes vor allem eine ungleiche Massenverteilung, welche auch eine erhebliche Vertrimmung verursacht und durch Ballast auszugleichen ist. Aus Gründen der Arbeitsvereinfachung wird allerdings möglichst ohne Ballast auszukommen gesucht.

Als Ergebnis umfangreicher Modellversuche hat LATES charakteristische Diagrammtypen der Abhängigkeit der Vorgänge beim Querstapellauf von der Wasserspiegelhöhe veröffentlicht [4], von denen

die wesentlichsten auf Abb. 3 wiedergegeben sind.

Eingehende Modellversuche hat auch DOUST durchgeführt und deren Ergebnisse in sog. Entwurfsdiagrammen dargestellt, welche die Grösse der Rollwinkel in Abhängigkeit von der metazentrischen Höhe sowie von der Endablaufgeschwindigkeit vermitteln [1], [2]. Diese Diagramme gelten aber nur für die konkreten untersuchten Verhältnisse, d.h. für jeweils bestimmte Schiffstypen und Wassertiefen. Verallgemeinerungsfähig sind jedoch die qualitativen Ergebnisse der Untersuchungen.

Sowohl DOUST als auch LATES versuchen, soweit aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen möglich, die Ursachen für den Verlauf der verschiedenen Abhängigkeiten zu erklären. Zum Beispiel lässt sich die Abnahme des Aussenkrängungswinkels $\varphi_{1 \max}$ mit wachsender Ablaufgeschwindigkeit durch die geringere für die Krängung zur Verfügung stehende Zeitspanne sowie die flachere Form der ballistischen Kurve erklären. Auf diese Einzelheiten soll hier nicht näher eingegangen werden. Es wurde jedoch versucht, die qualitativen Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen, welche meist in beschreibender Form sowie in Gestalt spezieller Diagramme vorliegen, in einer geschlossenen graphischen Darstellung zusammenzustellen. Die so entstandene Tabelle 1 hat zwar noch methodische Mängel, gestattet jedoch in relativ übersichtlicher Weise die Auswirkungen der Änderung bestimmter Einflüsse auf die einzelnen Vorgänge abzulesen.

4. Probleme der modellmässigen Nachbildung des Querstapellauf-Prozesses

Grundsätzlich kann die modellmässige Nachbildung des Querstapellaufs von Schiffen auf der Grundlage des FROUDEschen Ähnlichkeitsgesetzes erfolgen, was bereits mehrfach sowohl durch theoretische Überlegungen als auch Variantenuntersuchungen an Modellen sowie durch Vergleich der Ergebnisse von Modell- und Naturmessungen nachgewiesen wurde [1], [4]. Die sich daraus für die einzelnen Grössen ergebenden Umrechnungsfaktoren sind in nachstehender Tabelle 2 zusammengestellt:

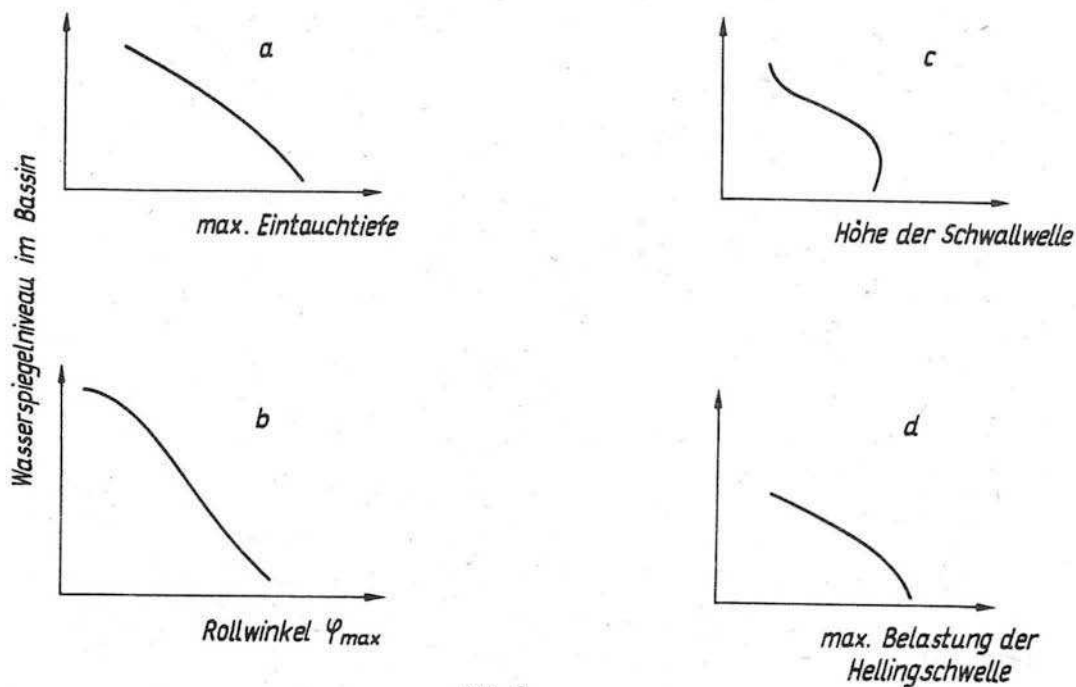


Abb. 3

Einfluß des Wasserspiegelniveaus im Bassin auf die Vorgänge beim Querstapellauf

Charakteristische Diagrammtypen, nach LATES [4]

Einflußgröße (unabhängige Veränderliche)	Auswirkungen auf: (abhängige Veränderliche)					Bemerkungen:
	Ablauf- geschwindigkeit (Endgeschwindigkeit)	Rollwinkel φ_1 (wasserseitig)	Rollwinkel φ_2 (Rückschlingerwinkel)	Eintauchtiefe	Höhe der Schwallowelle	
Metazentrische Höhe	— ⁴⁾	<	i. allg. > (nicht eindeutig) ²⁾			¹⁾ gegenseitige Abhängigkeit ²⁾ in einem bestimmten Bereich d. metazentr. Höhe findet eine Zunahme, in einem anderen eine Abnahme von φ_2 statt ³⁾ Versuche d. FAS ergaben gegenteilige Tendenz ⁴⁾ ein Strich im Feld besagt, daß entsprechend den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen die betreffende Größe keine Auswirkungen hat ⁵⁾ ein offenes Feld zeigt an, daß noch keine endgültige Klärung des Einflusses erfolgt ist
Displacement	— ⁵⁾	< ³⁾	>	>		
Bahnneigung	>	<	<			
Reibungsbeiwert	<	>	>	>		
Fallhöhe (Abstand zw. UK Kiel u. Wsp.)	—	>	>	>	>	
Wassertiefe (bei gleicher Fallhöhe)	—	>	>			
Fluß- bzw. Hafenbeckenbreite	—	—	>			
Ablaufgeschwindigkeit		entspricht dem Einfluß der Bahnneigung; umgekehrt wie der Einfluß des Reibungsbeiwertes				

Tabelle 1

Auswirkungen der verschiedenen Einflußgrößen beim Querstapellauf

dargestellt sind mittels der Symbole < („kleiner“) oder > („größer“) die Auswirkungen einer Vergrößerung (>) der Einflußgrößen

(nach Literaturangaben, ergänzt nach Versuchsergebnissen der FAS)

Zeile	Grösse	Dimension	Umrechnungsfaktor 1:k (Modellmaßstab 1:λ)	
			allgemein	für 1:λ = 1:20
1	Festwerte	dimensionslos	1:1	1:1
2	Längen (Breiten, Höhen)	m	1:λ	1:20
3	Flächen	m ²	1:λ ²	1:400
4	Volumina	m ³	1:λ ³	1:8000
5	Massen	kg	1:λ ³	1:8000
6	Kräfte	m kg s ⁻²	1:λ ³	1:8000
7	Drücke	m ⁻¹ kg s ⁻²	1:λ	1:20
8	Geschwindigkeiten	m/s	1:λ ^{0,5}	1:4,47
9	Beschleunigungen	m/s ²	1:1	1:1

Tabelle 2
Umrechnungsfaktoren

Besondere Probleme ergeben sich hinsichtlich der Modellierung der Reibungskoeffizienten. Als Voraussetzung für dynamische Ähnlichkeit müssen in ähnlich gelegenen Punkten von Modell und Natur die wirkenden Kräfte im gleichen Verhältnis stehen, damit die Resultierende aller Kräfte und somit die Beschleunigung in beiden Fällen die gleiche Richtung hat. Zur Erfüllung dieser Bedingung müssen die Reibungskoeffizienten als Verhältniszahlen in Modell und Natur übereinstimmen. Das lässt sich auch aus Zeile 1 der vorstehenden Tabelle ablesen, da die Reibungskoeffizienten als dimensionslose Festwerte im Verhältnis 1:1 von der Natur ins Modell bzw. umgekehrt zu übertragen sind. Die Realisierung dieser Forderung bereitet bestimmte Schwierigkeiten. Im vorliegenden Fall erfolgt der Stapellauf in der Natur vermittelt hölzerner Schlitten auf stählernen Ablaufbahnen, also bei gleitender Reibung. Zur Verminderung der Reibung wird ein Schmiermittel verwendet, welches vor dem Stapellauf dick auf die Ablaufbahnen aufgetragen wird. Infolge dieser mehrere Zentimeter starken Schmiermittelschicht erfolgt die Reibung im allgemeinen nicht als Holz auf Stahl, sondern als Holz auf Schmiermittel. Der beim Ablauf auftretende Reibungskoeffizient der Bewegung ist von

verschiedenen Faktoren abhängig, so u.a. von der Art des Schmiermittels, der Temperatur und dem Druck. Infolge dieser Abhängigkeiten ist der Reibungskoeffizient während des Ablaufs nicht an allen Stellen gleich, sondern ändert sich je nach Belastung und Temperatur. Es ist einleuchtend, dass im Modell mit absolut kurzen Ablaufstrecken die Veränderungen der Eigenschaften des Schmiermittels während des Ablaufs nicht in der Form, wie sie in der Natur auftreten, nachgebildet werden können. Eine Analyse des uns von der Werft übergebenen Stapellauf-Fettes ergab, dass es sich um ein natron-verseiftes Fett folgender Zusammensetzung handelt:

80 % Mineralöl
15 % Fettsäure
4 % Asche
1 % Wasser.

Gegenüber den tierischen Fetten und Paraffinen sind die neuerdings verwendeten mineralischen Schmiermittel auf Grund verschiedener Vorteile vorzuziehen. Einer besteht z.B. darin, dass sie weniger durch die Temperatur beeinflusst werden [10]. Trotzdem gelingt es auch mit diesem Fett nicht, die Verhältnisse, wie sie in der Grossausführung vorliegen, im Modell exakt nachzubilden. Der Reibungskoeffizient ist stark druckabhängig. So veranschaulicht z.B. die auf Abb. 4 wiedergegebene Grafik, wie der Reibungskoeffizient mit zunehmendem Druck abnimmt und erst bei grösseren Drücken asymptotisch einem konstanten Wert zustrebt. Eine Gleichheit der Reibungskoeffizienten in Natur und Modell setzt also die Gleichheit der Drücke auf der Ablaufbahn voraus. Die Zeile 7 der Tabelle 2 zeigt jedoch, dass die Drücke im linearen Verhältnis des Modellmaßstabes umzurechnen sind. Um Gleichheit der Drücke zu erreichen, müsste bei den durch das Schiffsmodell vorgegebenen Massen bzw. Kräften die Auflagefläche der Ablaufbahnen bzw. -schlitten gegenüber dem Modellmaßstab nochmals um den Betrag desselben, d.h. um das λ -fache, verkleinert werden.

Um weitere Aufschlüsse zu erhalten, wurden Vorversuche mit verschiedenen Schmiermitteln und bei verschiedenen Drücken sowohl an einer schiefen Ebene als auch auf horizontaler Unterlage durchgeführt

und die dabei ermittelten Reibungskoeffizienten der Ruhe und der Bewegung mit Angaben aus der Fachliteratur verglichen. Diese Angaben streuen in weiten Grenzen:

Pos.	Art der Oberfläche	Koeffizient		Bemerkungen
		Bewegung μ	Ruhe μ_0	
1	Stahl auf Stahl, trocken	0,09	0,40	
2	Stahl auf Stahl, geschmiert	-	0,12	
3	Bronze auf Stahl, trocken	0,105	0,110	
4	Bronze auf Stahl, geschmiert	0,092	0,098	
5	Eiche auf Eiche längs der Faser, trocken	0,48	0,62	
6	Eiche auf Eiche längs der Faser, mit Schmierung aus Seife	0,16	0,44	
7	Eiche auf Eiche quer zur Faser, trocken	0,34	0,54	
8	Eiche auf Eiche quer zur Faser, angefeuchtet mit Wasser	0,25	0,71	
9	Kiefer auf Kiefer, trocken	0,55	0,70	
10	Kieferne Kufen (Schlitten) auf glatter kieferner Ablaufbahn mit Schmierung aus 66 % Talg und 34 % Masut	0,14	0,25	nach Erfahrungen der Sormow-Werft
11	Holzkufen (Schlitten) auf glatter kieferner Ablaufbahn mit Schmierung aus Talg, Seife, Paraffin u.a.m.	0,032 bis 0,060	0,042 bis 0,071	nach Erfahrungen einer baltischen Werft

Tabelle 3
Koeffizienten für gleitende Reibung
nach LJACHNITZKIJ [?]]

In einem weiteren Handbuch werden folgende Werte genannt:

Metall auf Metall	trocken	$\mu = 0,17$
	geölt	$= 0,07$
Holz auf Holz	trocken	$= 0,20$
	geschmiert	$= 0,16$

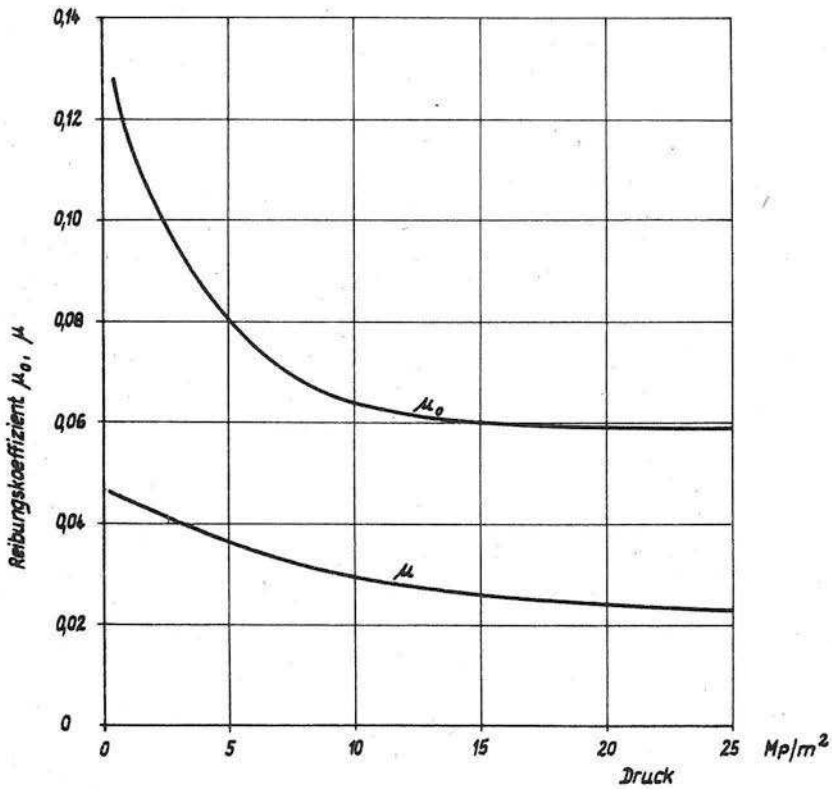


Abb. 4

Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom Druck

(aus [15], Seite 326)

VÖLKER [13] führt für Ablaufbahnen mit Schmierung aus einer Mischung von Schmierseife und Rindertalg Werte von $\mu = 0,02$ bis $0,05$ und $\mu_0 = 0,04$ bis $0,08$ an. LATES [4] nennt bei praktischen Stapellaufen gemessene Werte von μ zwischen $0,029$ und $0,23$, im Durchschnitt zwischen $0,04$ und $0,07$.

Bei unseren Vorversuchen erhielten wir für Metall auf Metall mit Schmierung durch Stapellauf-Fett und bei einer Flächenpressung von rd. 10 Mp/m^2 , wie sie etwa in der Natur auftritt, μ -Werte von $0,030$ bis $0,032$. Dieser Wert entspricht etwa dem aus Abb. 4 zu entnehmenden.

Um im Modell etwa gleiche Drücke zu erhalten, wäre ein Ablauf auf zwei Kufen von jeweils nur wenigen Millimetern Breite erforderlich gewesen. Dieser Versuch wurde auch durchgeführt, scheiterte jedoch, weil sich die schmalen, aus Messing gefertigten und gehobelten Kufen messerartig durch die Schmierschicht auf den Ablaufbahnen drückten und somit die Schmierung unwirksam wurde. Dadurch ergab sich ein zu hoher Reibungskoeffizient, und das Schiffmodell konnte nicht zum Ablauf gebracht werden.

Die praktische Unmöglichkeit der exakten modellmässigen Nachbildung der gleitenden Reibung beim Stapellauf ist auch bereits von anderen Versuchsanstalten erkannt worden. Aus diesem Grunde ersetzten sie die gleitende Reibung durch rollende Reibung, indem entweder die Ablaufbahnen oder -schlitten mit Rollen ausgebildet wurden [1], [4], [12]. Sehr umfangreiche Untersuchungen wurden von LATES in der Bukarester Forschungsanstalt für Wasserbau durchgeführt [4] bis [6]. Durch sinnvolle Konstruktion eines Hemmschuhes konnten dabei auf das Rollensystem unterschiedliche Drücke ausgeübt und dadurch die Reibungskoeffizienten in weiten Grenzen variiert werden; sie lagen zwischen $0,038$ und $0,435$. In der für den vorliegenden Auftrag zur Verfügung stehenden kurzen Frist war uns die Entwicklung und Fertigung eines derartigen Rollenwagens leider nicht möglich. Wir entschlossen uns daher, weiter mit gleitender Reibung zu arbeiten und die Abweichung der Grösse des Reibungskoeffizienten im Modell in Kauf zu nehmen. Diesen Entschluss ermöglichte uns u.a. die vorausgegangene Analyse des Querstapellauf-Prozesses, was uns gestattet, die

möglichen Auswirkungen der Abweichung einzuschätzen.

Wenn der Reibungskoeffizient im Modell etwas zu gross ausfällt, so verringert sich dadurch die Ablaufgeschwindigkeit, was wiederum eine Vergrösserung der Rollwinkel sowie der Eintauchtiefe nach sich zieht; ferner kommt das Schiff in etwas kleinerem Abstand von der Hellingkante ins Wasser. Durch einen zu hohen Reibungskoeffizienten würden die für den Erfolg des Stapellaufs massgebenden und in der Aufgabenstellung gefragten Werte also etwas zu ungünstig ausfallen. Dadurch liegen die Ergebnisse der Modellversuche auf der "sicheren Seite". Der Betrag der Ablaufgeschwindigkeit müsste, sofern dieser für irgendwelche statischen o.ä. Berechnungen interessiert; gegenüber den Modellversuchsergebnissen etwas erhöht werden.

Aus Gl. (1) errechnet sich

$$\mu = \tan \alpha - \frac{v_s^2}{2g \cdot s \cdot \cos \alpha} \quad (2)$$

Bezeichnet man den unter natürlichen Verhältnissen auftretenden (richtigen) Reibungskoeffizienten mit μ und einen davon abweichenden mit μ' sowie die zugehörigen Geschwindigkeiten analog mit v und v' , so erhält man aus (1)

$$\frac{v}{v'} = \frac{\sqrt{\tan \alpha - \mu}}{\sqrt{\tan \alpha - \mu'}} \quad (3a)$$

Nennt man diesen Verhältnisswert χ , so wird schliesslich

$$v = \chi \cdot v' \quad (3b)$$

Vermittels Gl. (3) ist also eine entsprechende Korrektur der Versuchsergebnisse möglich, sofern die unter den gegebenen Ablaufbedingungen (Bahn- und Schlittenkonstruktion, Schmierung) in der Natur auftretenden Reibungskoeffizienten bekannt sind.

5. Modellaufbau und Methodik der Modellversuche

Auf Grund der z.Z. der Auftragserteilung in der Versuchsanstalt zur Verfügung stehenden freien Räumlichkeiten wurde ein Modellmass-

stab 1:20 gewählt. Dieser Maßstab gewährleistet eine ausreichende Präzision der Messungen, andererseits lässt sich das Schiffsmodell noch bequem handhaben.

Es wurde ein Versuchsbassin mit den ungefähren Abmessungen 5,00 x 9,00 x 0,70 m aufgemauert. Aus den verfügbaren Peilplänen und Querschnittszeichnungen wurde ein mittlerer Querschnitt durch das Hafenbecken vor der Helling ermittelt, da im Hellingbereich sowohl die einzelnen Querschnitte als auch die Hafenbreiten bzw. die -grundrissform nur unwesentlich voneinander abweichen. Unmittelbar vor der Helling wurde eine Stapellaufgrube vorgesehen, deren Abmessungen auf Grund von Angaben aus der Fachliteratur angenommen wurden. Die Abb. 5 zeigt den so erhaltenen Querschnitt durch das Hafenbecken, welcher in dieser Form in der ganzen Länge des Versuchsbassins durchgehend in dasselbe eingebaut wurde. Die Modellierung erfolgte an Hand von hölzernen Profillehren aus Sand, auf welchem eine begehbare, etwa 5 cm starke Betondecke aufgebracht wurde. An der Seite der Helling wurde im unmittelbaren Bereich der Ablaufbahnen ein Glasfenster in die Beckenumrandung eingesetzt, durch welches die Eintauchung des Schiffskörpers beobachtet werden konnte. Während rechts und links des Beobachtungsfensters die Helling massiv in Mauerwerk und Beton ausgeführt werden konnte, wurde dieser Teil der Helling - der eigentliche Stapellaufplatz - aus einem kräftigen Rost aus Kanthölzern und Stahlprofilen gebildet, welcher den Beobachtungsstand überspannte. Auf diesem Rost waren mittels Schienenstühlen die stählernen Ablaufbahnen befestigt.

Die z.Z. auf der Werft verwendete Konstruktion der Ablaufbahnen und -schlitten soll im Prinzip auch für die neue Helling beibehalten werden. Gegenwärtig erfolgt der Stapellauf der Schiffe, deren Ablaufmasse zwischen etwa 50 und 270 t schwankt, mittels Holzschlitten über 4 stählerne bewegliche Ablaufbahnen, welche auf dem Boden aufgelegt werden. Bei den neuen Frosttrawlern ist für das zu 30 % ausgerüstete Schiff die Anordnung von 5 und für Ausrüstungsgrade von 50 und 70 % von 6 Bahnen vorgesehen. Jede der versetzbaren Ablaufbahnen besteht aus jeweils zwei Bahnteilen, welche aus abgewinkelten Stahlprofilen gebildet sind, wobei die aufwärts stehenden Winkelschenkel als Führung dienen.

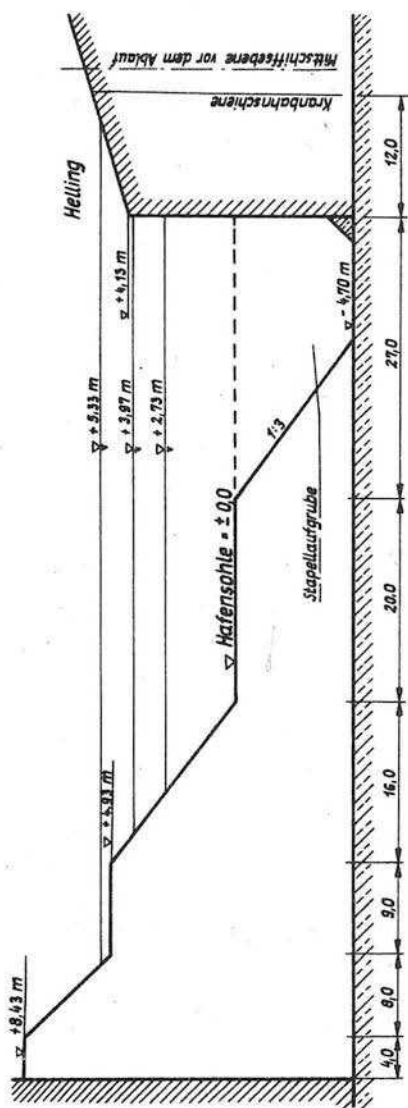


Abb. 5
Querschnitt durch das Hafenbecken

Um mit Rücksicht auf den Reibungskoeffizienten annähernd gleiche Drücke in Natur und Modell zu erhalten, müsste die Auflagefläche zwischen Ablaufbahn und -schlitten gegenüber dem eigentlichen Modellmaßstab nochmals um denselben Betrag verringert werden (s. Abschnitt 4). Dies führt zur Anordnung von nur zwei Ablaufbahnen im Modell. Wie bereits erwähnt, verlief ein Versuch mit dementsprechend schmalen Schlittenkufen jedoch erfolglos. Daraufhin wurden anstelle der schmalen Metallkufen hölzerne Schlitten mit breiter Auflagefläche auf denselben Ablaufbahnen probiert, was bei entsprechender Schmierung schliesslich zum Erfolg führte und einen Ablauf des Schiffsmodells gewährleistete. Die Schmierung durfte jedoch nicht mit pastenartigem Fett (wie z.B. das zur Verfügung gestellte Stapellauf-Fett), sondern musste mit dünnflüssigem Öl erfolgen. Der bei den verwendeten breiteren Holzkufen auftretende Druck im Modell ist allerdings kleiner als in der Natur. Die aus Hartholz gefertigten Modellschlitten wurden in ihren äusseren Umrissen denen der Schwellenstapel (Pallungen) in der Natur nachgeformt, mussten jedoch aus technischen Gründen im Gegensatz zur Grossausführung aus einem Stück bestehen. Die beiden Schlitten liessen sich durch Gurte am Schiffsrumpf anschnallen. Dadurch konnten Versuche sowohl mit am Schiff feststehenden Schlitten als auch derart, dass sich das Schiff beim Abkippen an der Hellingkante vom Schlitten löste, durchgeführt werden. Die beiden stählernen Ablaufbahnen hatten jeweils einseitig (ausseren) seitliche Führungsschenkel.

Die Verwendung von nur zwei Ablaufbahnen im Modell gegenüber mehreren in der Natur stellt eine Abweichung von der genauen geometrischen Ähnlichkeit dar. Abgesehen von dem Gesichtspunkt der Erzielung zumindest annähernd gleicher Drücke in Natur und Modell sprechen für die Anordnung von nur zwei Bahnen im Modell noch andere funktionelle Gründe. So ist z.B. in der Natur bei Verzicht auf feste Gründungen der Ablaufbahnen meist keine gleichmässige Druckverteilung auf die Schlitten gewährleistet, wodurch auch dort ungünstigstenfalls ein Ablauf auf nur zwei Bahnen vorkommen kann. Die Anordnung einer grösseren Anzahl "aktiver" Ablaufbahnen und -schlitten im Modell bringt auch rein modelltechnische Nachteile mit sich. Bei sämtlichen uns bekannt gewor-

denen bisherigen Modellversuchen für Querstapelläufe wurde ebenfalls stets mit nur zwei geführten und aktiv zum Ablaufvorgang benutzten Bahnen bzw. Schlitten gearbeitet. Sofern mehrere Bahnen und Schlitten angeordnet waren, dienten diese nicht der eigentlichen Vermittlung des Ablaufs, sondern nur als Attrappen bzw. bei am Schiff festsitzenden Schlitten der schwerpunktrichtigen Nachbildung des Schiff-Schlitten-Komplexes. Durch die Verwendung von nur zwei Ablaufbahnen im Modell kann u.U. - worauf auch LATES [4] hinweist - das Phänomen des evtl. ungleichmässigen Ablaufs des Schiffes über seine ganze Länge (infolge von Massenunterschieden) etwas beeinflusst werden. Im vorliegenden Fall mit Massenkonzentration am Heck und daraus resultierender stark hecklastiger Vertrimmung des teilausgerüsteten Schiffes (siehe Tabelle 4 und Abb. 6) würden die Verhältnisse bei zwei Ablaufbahnen jedoch höchstens noch ungünstiger werden, so dass durch die evtl. Abweichung auch hier die Modellversuchsergebnisse auf der "sicheren Seite" liegen.

Die Abmessungen des untersuchten Frosttrawlers sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Das für die Versuche verwendete Schiffsmodell wurde in robuster Ausführung aus Holz gefertigt. Es wurde für Ausrüstungsgrade von 50 und 70 % entsprechend den Angaben der Tabelle 4 bzw. den Gewichtskurven der Abb. 6 durch die Schiffbauversuchsanstalt des Institutes für Schiffbau schwerpunktgerecht ausgetrimmt.

Nach Fertigstellung der gesamten Modellanlage war es erforderlich, in Vorversuchen eine zweckdienliche Versuchsmethode zu erarbeiten. Aufwendigere Mess- und Registriergeräte, wie sie z.T. im Ausland bei Querstapellaufuntersuchungen verwendet wurden (z.B. Kreiselgeräte mit elektrischer Fernübertragung), konnten in der kurzen zur Verfügung stehenden Zeit nicht entwickelt werden. Ebenfalls aus Zeitgründen wurde eine Versuchsmethode angestrebt, bei welcher sofort oder zumindest in kurzer Zeit nach Beendigung einer Versuchsserie die interessierenden Grössen zahlenmässig ausgewertet vorliegen.

Die Höhe der beim Stapellauf auftretenden Schwallwelle konnte mittels eines in der Versuchsanstalt Potsdam entwickelten und

Tabelle 4

Abmessungen des Frosttrawlers Typ II

Ausrüstungs- grad	Verdrängung ²⁾		T_m ³⁾		T_v		T_h	
	Natur m ³	Modell ¹⁾ dm ³	Natur m	Modell mm	Natur m	Modell mm	Natur m	Modell mm
30%	386,5	48,3	2,02	101,0	0,42	21,0	3,62	181,0
50%	456,0	57,0	2,23	111,5	0,78	39,0	3,68	184,0
70%	524,0	65,5	2,43	121,5	0,75	37,5	4,11	205,5

Hauptabmessungen (Naturmaße) :

$L_{\text{üa}}$	= 48,95 m	$T_{m_{\text{KWL}}}$	= 3,50 m
L_{pp}	= 44,30 m	$T_{m_{\text{FrB}}}$	= 3,80 m
B_{Spt}	= 10,00 m	Kielfall	= 1,00 m
H	= 5,50 m		

$$L_{\text{pp}} : H = 8,06$$

$$B : H = 1,82$$

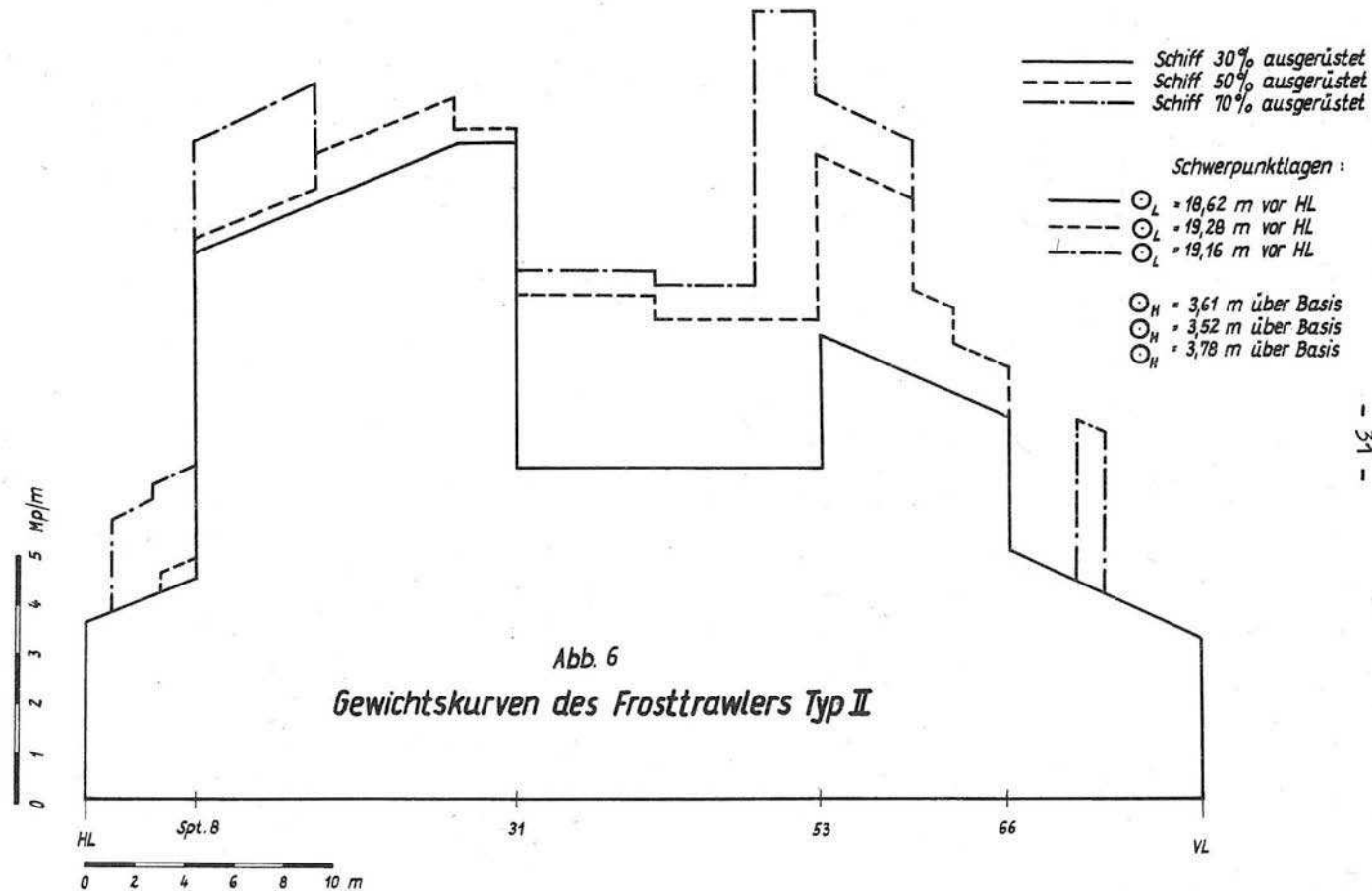
Bemerkungen :

¹⁾ Modellmaßstab 1:20

²⁾ auf Außenhaut in Flußwasser
(einschl. 6% Außenhautzuschlag)

³⁾ alle Tiefgänge auf UK Kiel bezogen

Hauptabmessungen nach Generalplan,
alle übrigen Werte nach Angaben der
Schiffbauversuchsanstalt



auch für andere hydraulische Modellversuche eingesetzt, auf dem Prinzip des Schreibpegels beruhenden elektrischen Registriergeräts bestimmt werden. Zur Messung der statischen Wasserstände im Hafenbecken diente ein einfacher Maßstab mit Millimeterteilung als Pegel.

Zur Messung der Rollwinkel wurden Vorversuche mit Pendelgeräten durchgeführt. Sie führten jedoch nicht zum Ziel, da der Pendel, welcher mit Rücksicht auf die Austrimmung des Schiffsmodells sehr leicht ausgeführt werden musste, nicht ausreichend gedämpft werden konnte. Filmaufnahmen, welche - insbesondere als Zeitlupenaufnahmen - für die Analyse des Querstapellaufes durchaus gute Möglichkeiten bieten, schieden infolge des zeitraubenden Entwicklungs- und Auswertungsprozesses aus den bereits genannten Gründen vorerst ebenfalls aus. Nach verschiedenen Vorversuchen wurde schliesslich eine fotografische Messmethode entwickelt, welche es gestattet, nicht nur die Rollwinkel, sondern sämtliche interessierende Grössen in einer einzigen, relativ schnell auszuwertenden Darstellung zu erfassen. Zu diesem Zwecke wurde im Schwerpunktquerschnitt des Schiffsmodells auf dem Deck ein leichter Mast aufgestellt, an welchem in bestimmten Abständen drei kleine 3,5-Volt-Glühlampen befestigt waren (siehe Abb. 7). Der Abstand zwischen der unteren und oberen Lampe betrug 30 cm. Die dritte Lampe lag zwischen diesen beiden, 10 cm über der unteren. Die Lampen wurden durch einen Klein-Akku gespeist, wobei die mittlere über eine Schaltuhr mit $1/5$ -Sekunden-Kontakt gesteuert wurde und intermittierend aufleuchtete. Eine Überprüfung der Schaltuhr mittels eines Schleifenoszillographen ergab, dass sie während der Zeitdauer einer Sekunde die Lampe jeweils 5 mal für 0,08 s aufleuchten und für 0,12 s erlöschen liess ($5 \times 0,08 + 5 \times 0,12 = 0,40 + 0,60 = 1,00$ s); somit ergaben sich je Sekunde 10 auswertbare Kontakte. Für die Versuchsdurchführung wurden die Versuchshalle verdunkelt, die Lampen am Schiffsmodell eingeschaltet und der gesamte Ablaufvorgang mit einer querab aufgestellten Fotokamera mit offener Blende aufgenommen. Die Blende wurde erst geschlossen, nachdem das Schiffsmodell im Hafenbecken zur Ruhe gekommen war, um sämtliche Schiffsbewegungen bis dahin festhalten zu können. Der Kamera-

standpunkt war unter Berücksichtigung der Ausdehnung und Lage des Aufnahmegegenstandes sowie der Brennweite des Objektivs so gewählt worden, dass der Parallaxenfehler möglichst klein wurde; Vergleichsmessungen ergaben eine für den vorliegenden Zweck ausreichende Messgenauigkeit. Beispiele der so erhaltenen fotografischen Aufnahmen zeigen die Abb. 9 bis 11. Die Ausgangsposition vor dem Stapellauf wird auf den Bildern durch die drei senkrecht übereinander liegenden Lichtpunkte am linken Bildrand gekennzeichnet; die Ebene der Hellingkante wird durch einen weiteren Lichtpunkt markiert.

Unmittelbar nach Abschluss einer Versuchsserie wurde der belichtete Kleinbilddfilm entwickelt und zwecks Auswertung mittels eines Bildwerfers auf eine Projektionsfläche projiziert. Der Abstand wurde so gewählt, dass die Bildfläche mit den Lichtlinien etwa die Grösse eines Formates A 4 erhielt. Von der Projektionsfläche wurden die Linien auf ein Blatt Papier (Format A 4) abgezeichnet. Durch die festliegenden und auf den Bildern wiedergegebenen markanten Punkte bzw. Entfernungen ist ein Abbildungsmaßstab gegeben. Nach Einzeichnen eines durch die Lichtpunkte festgelegten rechtwinkligen Koordinatensystems und Berechnen des Abbildungsmaßstabes lassen sich aus den Darstellungen sämtliche interessierenden Grössen entnehmen.

Die Abbildungen vermitteln ein vollständiges und anschauliches Bild der Kinematik des gesamten Stapellaufprozesses. Die an die Extremstellen der von der unteren und oberen Lampe beim Rollvorgang beschriebenen Bahnen angelegten gemeinsamen Tangenten ergeben die wasser- und landseitigen Rollwinkel. Ferner kann man die ballistische Kurve beim Abkippen von der Hellingkante entnehmen. Durch Bezug auf eine Horizontale bzw. Vergleich mit der Schiffslage nach Abschluss des gesamten Vorganges lässt sich die Eintauchung beim Stapellauf ermitteln. Zu diesem Zweck war bei verschiedenen Versuchen ausser den drei Lampen am Mast eine vierte am Heck unmittelbar in der Ebene des Spants 0 angebracht. Wie bereits erwähnt, konnte die Eintauchung mittels direkter Beobachtung durch ein Fenster in der Kaimauer kontrolliert werden. Da bei den fotografischen Aufnahmen die Blende erst geschlossen wurde, wenn das Schiffsmodell zur Ruhe gekommen

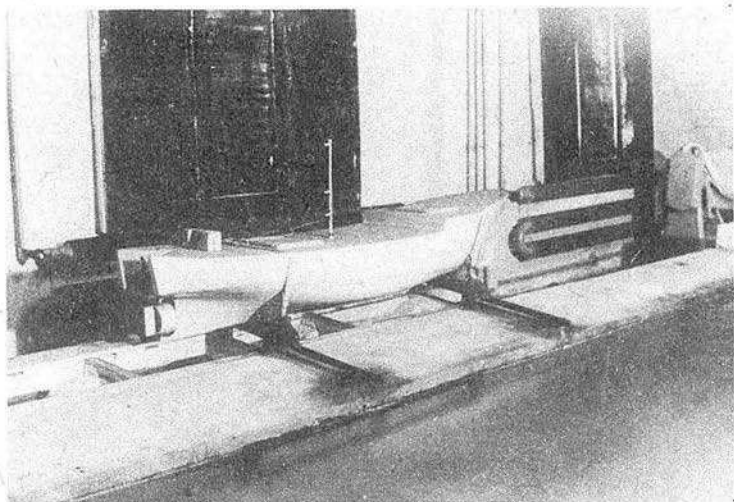


Abb. 7: Schiffsmodell auf der Helling in der Ausgangsposition vor dem Ablauf (in Schiffsmittle der Mast mit den Glühlämpchen; am Schiffsrumpf angezeichnet sind die KWL sowie die Wasserlinien für 50 und 70 %-ige Ausrüstung)

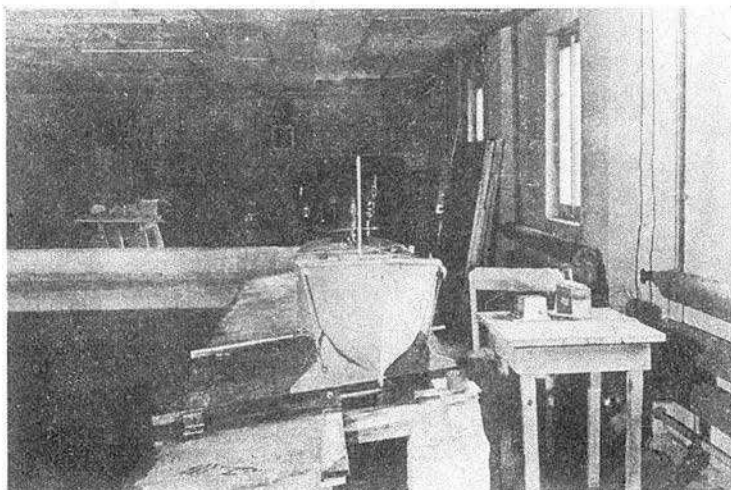


Abb. 8: Schiffsmodell auf der Helling in der Ausgangsposition vor dem Ablauf (rechts im Bild Akku und Schaltuhr zur intermittierenden Belichtung)

Fotografische Aufnahmen der Querstapellauf-Kinematik

(Beispiele)

Ausrüstungsgrad 70 %; Bahnneigung 1:6

Die Aufnahmen zeigen die Trajektorien der durch Glühlämpchen markierten Punkte an dem in der Schwerpunkts-ebene des Schiffes errichteten Mast (siehe Abb. 7). Das mittelste Lämpchen leuchtete intermittierend auf.

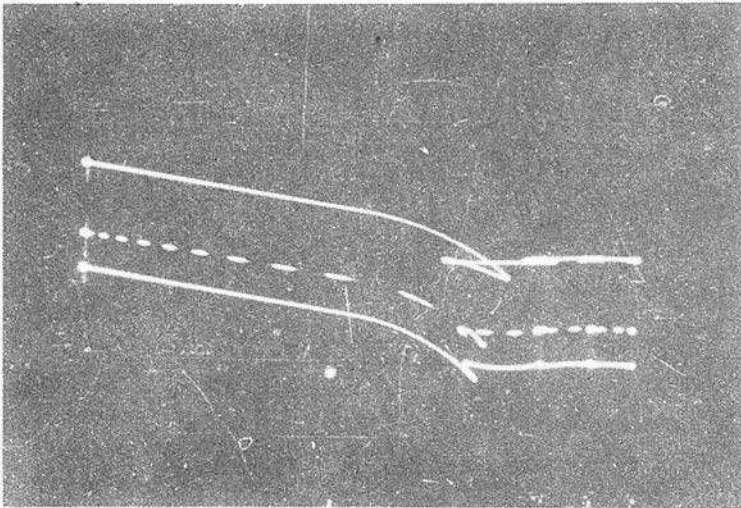


Abb. 9: Wasserstand: + 5,33 m

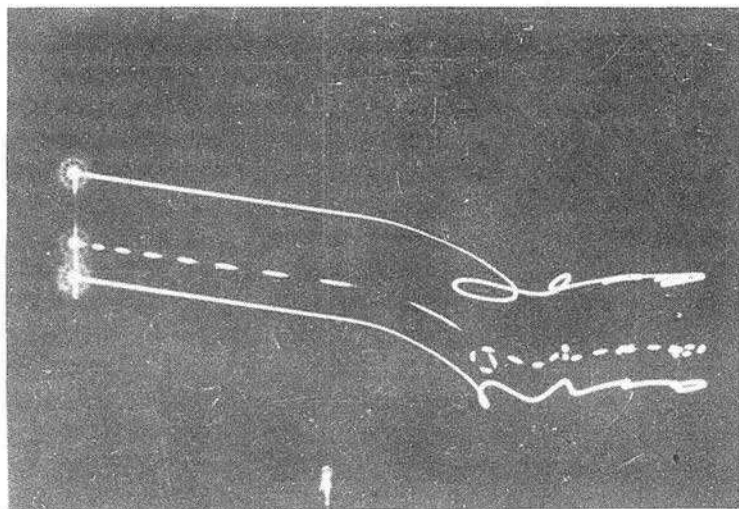


Abb. 10: Wasserstand: + 3,97 m = MW

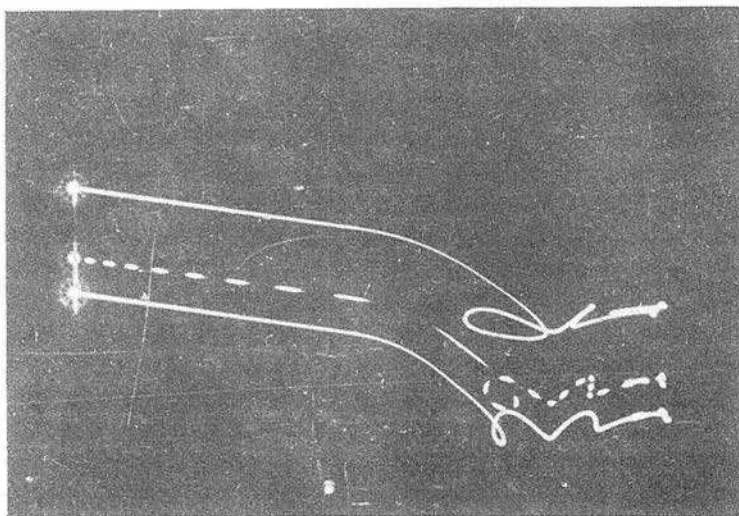


Abb. 11: Wasserstand: + 2,73 m

war, liess sich daraus auch der Auslaufweg entnehmen. Durch die intermittierende Belichtung konnte aus den Aufzeichnungen der mittleren Lampe am Mast gleichzeitig die Geschwindigkeit ermittelt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich während des rein transversalen Ablaufvorganges (bis etwa zur Hellingkante) um die tatsächlichen Ablaufgeschwindigkeiten handelt, nach Beginn des Kippens bzw. Drehens jedoch um Winkelgeschwindigkeiten. Somit konnte auf gesonderte Einrichtungen zur Geschwindigkeitsmessung, wie sie ursprünglich erwogen waren (Schleifkontakte oder Nachlaufrolle mit Umdrehungszählung), verzichtet werden.

Die entwickelte Messmethode stellt ein einfach zu handhabendes Verfahren dar, welches einen schnellen Versuchsfortgang und eine kurzfristige Auswertung gestattet. Zur Erzielung repräsentativer Mittelwerte war es daher möglich, eine grössere Anzahl von Einzelversuchen durchzuführen. Jeder Einzelversuch (unterschieden durch Neigung der Ablaufbahn, Ausrüstungsgrad und Wasserstand) wurde jeweils 5 bis 6 mal wiederholt. Der qualitative Vergleich der Bilder sowie der daraus ermittelten Zahlenwerte zeigt, dass zwischen den einzelnen Wiederholungsversuchen keine grossen Unterschiede bestehen und sich die kinematischen Bilder des Ablaufvorganges jeweils ziemlich decken. Somit war die Gewähr gegeben, aus den Modellversuchen richtige und auf Grund der Ähnlichkeitsbeziehungen auf die Natur übertragbare Messwerte zu erhalten.

6. Versuchsergebnisse

6.1 Allgemeines

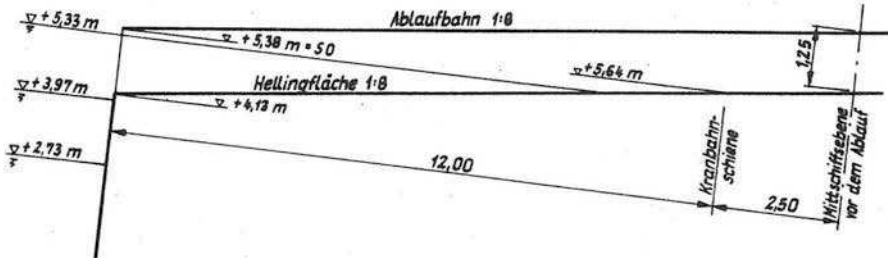
In das Versuchsprogramm wurden die drei auf den Abb. 5 bzw. 12 eingezeichneten Wasserstände aufgenommen. Bei der Festlegung des höchsten im Modell zu untersuchenden Wasserstandes wurde in Absprache mit dem Auftraggeber davon ausgegangen, dass Hochwasserspitzen nicht berücksichtigt zu werden brauchen. Nach der Wasserstandsdauerlinie für das letzte Jahrzehnt wird der gewählte max. Wasserstand an nur etwa 25 Tagen im Jahr überschritten. Der niedrigste Wasserstand, bei welchem noch ein sicherer Stapellauf gewährleistet sein sollte, wurde von der Werft benannt.

Am 30. April 1965 wurde auf der Elbe-Werft Boizenburg das erste Schiff der Frosttrawler-Serie auf der z.Z. vorhandenen Ablaufbahn vom Stapel gelassen (Abb. 17). Das Schiff war zu etwa 30 % ausgerüstet, jedoch durch Ballast im Vorschiff etwas ausgetrimmt worden. Dabei mussten bis zu rd. 85 t je Ablaufbahn aufgenommen werden; diese Werte wurden bisher auf einer Flusswerft nicht erreicht [17]. Der Stapellauf erfolgte bei einem extrem hohen Wasserstand, welcher noch 0,62 m über dem höchsten im Modell untersuchten lag und nach der genannten Wasserstandsdauerlinie an 10 Tagen im Jahr überschritten wird. Der Stapellauf bei diesem extremen Wasserstand ergab sich ausnahmsweise als notwendig infolge des in diesem Jahre lange andauernden Frühjahrshochwassers. Der Stapellauf wurde unter sehr erschwerten Bedingungen durchgeführt, da das Hochwasser die gesamte Vorhelling⁺ überflutete und bis an die Kielpallungen stand; die Ablaufbahnen mussten z.T. unter Wasser ausgerichtet werden. Trotz des hohen Wasserstandes und der dadurch stark verkürzten freien Bahnlänge kam das Schiff von der Hellingkante frei. Dieser Natur"versuch", auf den im einzelnen noch in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird, ist für die weiteren Einschätzungen sehr wertvoll. Obwohl der Stapellauf am 30. April 1965 bei einem höheren Wasserstand als der im Modell maximal untersuchte stattfand, wurde in Absprache mit dem Auftraggeber entschieden, diesen Wasserstand nicht mehr in die Modellversuche mit einzubeziehen. Der praktische Versuch hat gezeigt, dass auch bei dem extrem hohen Wasserstand ein einwandfreier Stapellauf möglich ist. Obwohl ein solcher Wasserstand nur selten vorkommt und sich durch die ungünstigen Bahnverhältnisse nur beschränkte Möglichkeiten für Messungen der Ablaufgeschwindigkeit ergaben, hatte dieser Stapellauf den Vorteil, extreme Verhältnisse überprüfen zu können.

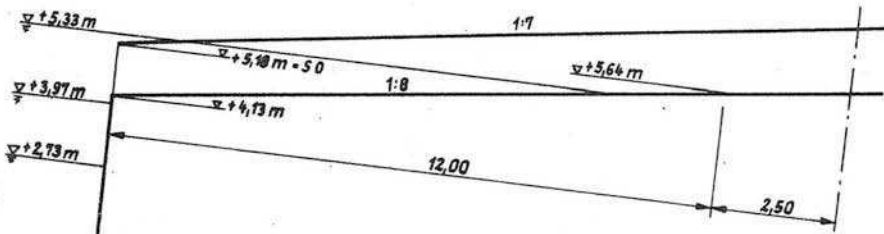
Wie bereits erwähnt, wurden die Modellversuche sowohl mit am Schiffsmodell feststehenden als auch losen Schlitten durchgeführt. Bei letzterer Anordnung konnte sich also das Schiff beim Abkip-

⁺) Vorhelling = unterer, bei höheren Wasserständen unter Wasser liegender Teil der Helling bzw. Ablaufbahnen

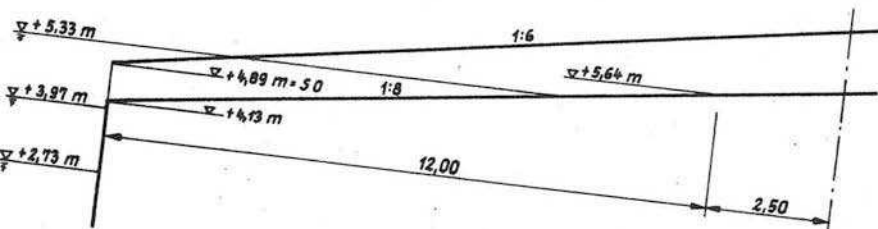
Untersuchte Varianten der Hellingneigung



Variante 1



Variante 2



Variante 3

Tabelle 5
Tabellarische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse
(Naturmaße)

Neigung der Ablaufbahn	Ausrüstungs- grad	Wassertiefe		Geschwindigkeit am Ende der Ablaufbahn	Rollwinkel wasserseitig φ_1	Rollwinkel landseitig φ_2	Schwerpunktstand v.d. Hellingkarte bei der ersten Rollschwingung	Trimm am Heck ³⁾	Höhe der Schwallwelle ⁴⁾
		über Hafensohle	in der Stapellaufgrube						
		m	m	m/s	°	°	m	m	m
1	2	3a	3b	4	5	6	7	8	9
1:7	50 %	5,33	10,03	3,05	20	11	7,60	0,45	0,40
		3,97 ¹⁾	8,67	3,30	23	13	8,60	0,80	0,65
		2,73	7,43	3,30	26	13	9,10	1,10	0,70
	70 %	5,33	10,03	3,05	23	16	7,50	0,50	0,50
		3,97	8,67	3,30	26	18	8,65	1,00	0,80
		2,73	7,43	3,30	27	18	9,10	1,60 ²⁾	1,00
	1:6	5,33	10,03	3,05	15	11	7,60	0,55	0,40
		3,97	8,67	3,45	15	12	8,80	0,90	0,65
		2,73	7,43	3,45	19	12	9,60	1,20	0,70
	70 %	5,33	10,03	3,75	17	13	7,70	0,70	0,50
		3,97	8,67	4,25	17	13	9,00	1,20	0,90
		2,73	7,43	4,25	23	14	9,70	1,60 ²⁾	1,00

Bemerkungen:

¹⁾ MW

²⁾ max. 1,90 bis 2,00 m !

³⁾ Tiefertauchung gegenüber
freidriftendem Zustand

⁴⁾ Meßstelle kurz vor dem Böschungsfuß
am gegenüberliegenden Ufer

Alle Werte sind Mittelwerte
aus jeweils einer größeren Anzahl
von Einzelversuchen

pen von der Hellingkante vom Schlitten trennen bzw. umgekehrt. Es zeigte sich, dass dies bei höheren Wasserständen nicht immer der Fall ist, da der Auftrieb den Schlitten weiter an die Aussenhaut anpresst. Dies ist auch bei Stapelläufen in der Natur zu beobachten. Ein Vergleich der bei festsitzenden und losen Schlitten gemessenen Werte zeigte keine nennenswerten Unterschiede.

Die Modellversuche wurden für einen konkreten praktischen Fall ausgeführt. Die tabellarische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse in Tabelle 5 sowie die graphischen Darstellungen enthalten die hierfür massgebenden, durch die Versuche ermittelten Zahlenwerte. Darüber hinaus bestätigten die Versuche die in der Fachliteratur aufgezeigten allgemeinen Vorgänge beim Querstapellauf. Die für den vorliegenden praktischen Fall ermittelten Werte werden in den nachfolgenden Abschnitten den in der Literatur zu findenden Angaben (Überschlagswerte u.ä.) gegenübergestellt.

6.2 Neigung der Ablaufbahn

In der Aufgabenstellung war vom Auftraggeber erwähnt worden, dass nach der Literatur die Ablaufbahn etwa eine Neigung von $\tan \alpha = 1:10$ haben müsste. Die Angaben in der Literatur schwanken in weiten Grenzen. Die Neigung kann um so geringer sein, je grösser das Schiff und damit die Ablaufmasse ist. LJACHNITZKIJ [7] nennt für Querhellinge allgemein folgende Werte:

für kleine Schiffe	1:4 bis 1:8
für mittlere Schiffe	1:8 bis 1:12.

Weitere Angaben aus der Literatur beziehen sich auf konkrete Beispiele ausgeführter Anlagen, z.T. auch auf Modellversuchsergebnisse. Diese bieten dann die Möglichkeit, die übrigen Abmessungen der Anlage vergleichsweise mit zu berücksichtigen. Es werden für europäische Werften Neigungen zwischen etwa 1:8 bis 1:19 angegeben, für amerikanische Werften mit grossen Schiffen 1:7,2 bis 1:11,6.

Eine auf Grund der Modellversuche von LATES für die Schiffswerft Galatz in Rumänien errichtete Bahn für Frachter von 4500 t dwt hat z.B. bei einer Länge von rd. 55 m bis zur Hellingkante (über 25 m freie Bahnlänge beim höchsten Wasserstand) eine Neigung von 1:8

erhalten; die auf dieser Helling erzielten praktischen Ergebnisse sind gut und zeigten Übereinstimmung mit denen der Modellversuche [4], [5].

Die genannten Werften weisen fast durchweg wesentlich längere Bahnen auf als die der Elbe-Werft Boizenburg. Mit 14,5 m von der Mittschiffsebene vor dem Stapellauf bis zur Hellingkante ist diese Bahn extrem kurz. Die steilste uns bekannt gewordene Neigung hat die Ablaufbahn einer polnischen Werft mit 1:5,6, wobei der Ablauf auf Rollen erfolgt; die Bahn hat ebenfalls eine extrem kurze Länge von nur etwas über 14 m [8]. Sie wurde entwickelt für den Stapellauf von Trawlern mit einer Stapellaufmasse von rd. 700 t; die dortigen Verhältnisse kommen also den vorliegenden ziemlich nahe.

Vorüberlegungen führten uns zu der Auffassung, dass für die auf der Elbe-Werft Boizenburg geplante Ablaufbahn eine Neigung von 1:10 zu flach sei. Im Vergleich zu anderen Werften steht nur eine relativ kurze Beschleunigungsstrecke zur Verfügung. Um dem Schiff die erforderliche Endgeschwindigkeit zu erteilen, muss bei der extrem kurzen Bahn die Neigung die steileren Grenzwerte erreichen.

Der am 30. April 1965 bei einem extrem hohen Wasserstand durchgeführte Stapellauf auf der z.Z. verwendeten Ablaufbahn mit einer Neigung von 1:6,67 zeigte, dass auf dieser Bahn auf jeden Fall ein einwandfreier Ablauf möglich ist.

Bei den Modellversuchen wurden Bahnneigungen von 1:8, 1:7 und 1:6 untersucht (siehe Abb. 12). Bei einer Neigung von 1:8 kam das Schiff nicht in Bewegung bzw. blieb nach kurzen Wegen auf der Bahn stehen. Teilweise spielt hier zwar der im Modell gegenüber der Natur etwas höhere Reibungskoeffizient mit (siehe Abschnitt 4). Für die weiteren Entscheidungen sollten jedoch auch die bisherigen Erfahrungen genutzt werden. In Übereinstimmung mit den praktischen Erfahrungen auf der Werft, der Auswertung der Literatur und den Modellversuchsergebnissen wird vorgeschlagen, die neue Ablaufbahn mit einer Neigung von 1:7 auszuführen.

Die Darstellung der untersuchten Varianten auf Abb. 12 veranschaulicht die Höhenverhältnisse. (Aus modelltechnischen Grün-

den wurde nur die Bahn selbst verschieden geneigt; die aus Beton modellierte Hellingfläche behielt bei allen Versuchen die Neigung 1:8, was jedoch keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat). Da als Ausgangspunkt die Höhe der Kranbahnschiene festliegt, wird die Absturzhöhe an der Hellingkante bei flacheren Bahnneigungen grösser. VLIG [10] weist darauf hin, dass in der niederländischen Praxis die Fallhöhen meist gering sind und hebt als beachtlich hervor, dass in Amerika grosse Schiffe mit freien Fallhöhen (Höhenunterschied zwischen Wasserspiegel und Unterkante Kiel an der Hellingkante) von "nicht weniger als 3,50 m" zum Ablauf gelangten. Die nachstehende Tabelle zeigt, dass vorliegendenfalls Werte derselben Grössenordnung erreicht werden. Da der Frosttrawler 1,00 m Kielfall hat, werden die Fallhöhen auf die Basis bezogen, welche in der Schwerpunktsebene mit UK. Kiel identisch ist; infolge hecklastiger Vertrimmung des teilausgerüsteten Schiffes sind die entsprechenden Werte am Heck geringer.

Hellingneigung	OK. Ablauf- bahn [m]	Basis über OK. Bahn [m]	Basis [m]	Wstd. [m]	Fallhöhe [m]
1:8	+ 5,38	0,66	+ 6,04	+ 3,97	2,07
				+ 2,73	3,31
1:7	+ 5,18	0,66	+ 5,84	+ 3,97	1,87
				+ 2,73	3,11
1:6	+ 4,89	0,66	+ 5,55	+ 3,97	1,58
				+ 2,73	2,82

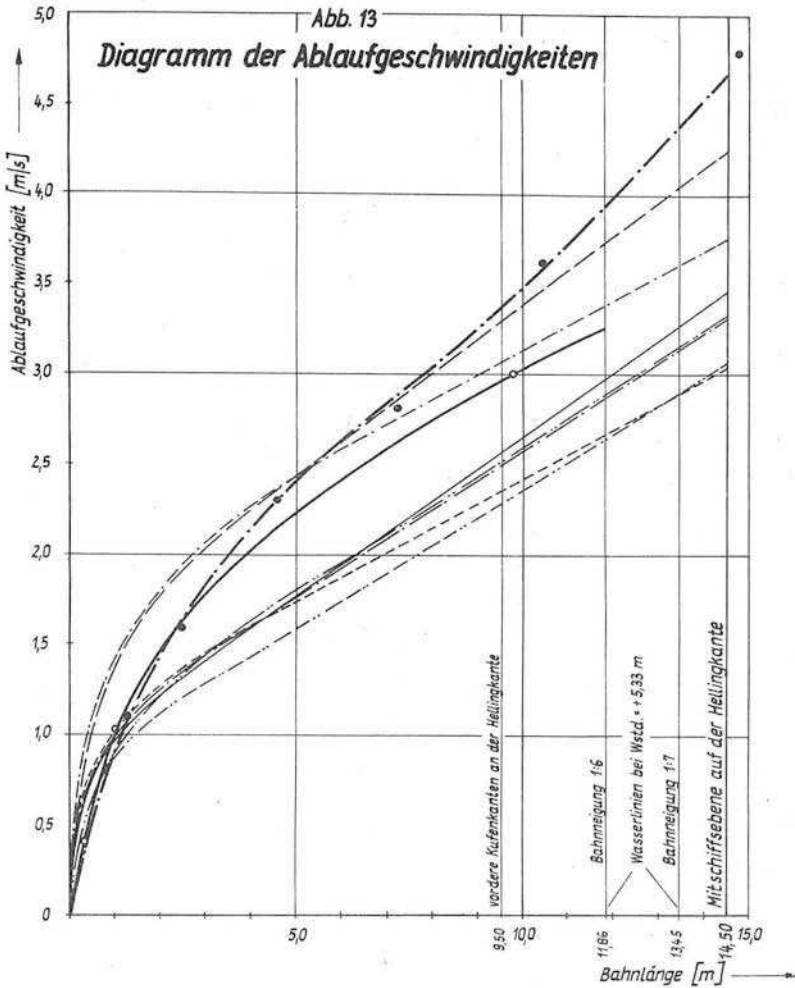
Tabelle 6
Freier Fall an der Hellingkante
bei niedrigsten Wasserständen

6.3 Ablaufgeschwindigkeit

Auf Abb. 13 wurden die aus den fotografischen Registrierungen ermittelten Kurven des Geschwindigkeitsverlaufs in Abhängigkeit von der Bahnlänge aufgetragen. Die dargestellten Kurven repräsentieren Mittelwerte aus einer grossen Zahl von Messpunkten, welche mit einer bestimmten Streuung behaftet sind. Für die einzelnen

Versuchsreihen (Neigung der Ablaufbahn, Ausrüstungsgrad, Wasserstand) wurden die Kurven jeweils unabhängig voneinander gezeichnet, und es ist beachtlich, dass nach Darstellung in einem gemeinsamen Diagramm festzustellen ist, dass sich ähnliche bzw. z.T. sogar deckende Kurven ergaben. Für Wasserstände unter Hellingkante ergaben sich bei jeweils gleicher Bahnneigung und gleichem Ausrüstungsgrad übereinstimmende Kurven, da in diesen Fällen die Veränderung des Wasserspiegelniveaus keinen Einfluss auf den Ablauf auf den Bahnen hat. Bei dem Wasserstand von + 5,33 m liegt der untere Teil der Ablaufbahn unter Wasser, was offensichtlich geschwindigkeitsvermindernd wirkt. Ein Knick in der Kurve liess sich, unter Beachtung der Streuung der einzelnen Messpunkte, allerdings nicht angeben. Bei der nur geringen Überstauung der Ablaufbahnen ist der Wasserwiderstand auch noch nicht erheblich. Während bei der schwächeren Bahnneigung 1:7 ein Einfluss des Displacements (korrespondierend mit dem Ausrüstungsgrad) nicht festgestellt werden konnte, ist bei der Neigung 1:6 ein solcher offensichtlich. Dass bei der stärkeren Bahnneigung die Geschwindigkeiten allgemein höher sind, ist selbstverständlich. Die Geschwindigkeiten am Ende der Ablaufbahn wurden in die Tabelle 5 eingetragen.

Von der Werft wurden bereits bei mehreren Stapelläufen der neuen Frosttrawler-Serie Messungen der Ablaufgeschwindigkeit durchgeführt. Diese Stapellaufmessungen in der Natur werden von der Werft weiter ausgewertet. Freundlicherweise stellte uns die Werft einige Messergebnisse zur Verfügung, um Vergleiche mit den Ergebnissen der Modellversuche durchführen zu können. Zu diesem Zwecke haben wir die Ergebnisse der ersten beiden Naturmessungen mit in die Abb. 13 eingezeichnet. Auf Grund der bisher auf der z.Z. vorhandenen Ablaufbahn durchgeführten Stapelläufe von Frosttrawlern kann festgestellt werden, dass die Modellversuchsergebnisse bestätigt wurden. Hinsichtlich der absoluten Grösse der Reibungskoeffizienten zeigen auch die Unterschiede zwischen den beiden Naturmessungen, wie sie im Einzelfall voneinander abweichen können (je nach Zustand der Ablaufbahn, im Trockenen oder teilweise unter Wasser). Für den Stapellauf am



Modell	Bahnneigung	Ausrüstungsgrad %	Wasserstand
_____	1:6	50	} unter Hellingkante
_____	1:6	70	
_____	1:7	90	
_____	1:7	70	
_____	1:6	50	
_____	1:6	70	+ 5,33 m
_____	1:7	50/70	+ 5,33 m
Natur: _____	1:6,67	< 30	+ 5,95 m
• - - - - -	1:7,81	< 30	+ 4,10 m

30.4.1965 lag der Reibungskoeffizient zwischen $\mu = 0,10$ bis $0,125$; für den zweiten Stapellauf bei niedrigerem Wasserstand und nicht überfluteter Vorhelling wurde ein Reibungskoeffizient von rd. $0,07$ ermittelt.

Das Problem der Modellierung der Ablaufgeschwindigkeit bzw. der Reibungskoeffizienten wurde bereits in Abschnitt 4 eingehend behandelt. Aus den auf Abb. 13 aufgetragenen Ablaufgeschwindigkeiten errechnet sich für die Modellversuche nach Gl. (2) ein durchschnittlicher Reibungskoeffizient von $0,12$. Dieser erscheint für Stapelläufe (auf dicker Schmierschicht) relativ hoch, hat aber nach Tabelle 3 und den hinter dieser angeführten Werten eine bei den vorliegenden Modellverhältnissen durchaus zu erwartende Grösse. Vor allem ist beachtlich, dass er sich auch mit dem in der Natur beim ersten Stapellauf der Frosttrawler-Serie ermittelten Wert praktisch deckt. Unter Heranziehung der verschiedenen in der Literatur angegebenen, bei praktischen Stapelläufen erreichten Reibungskoeffizienten sowie unter Benutzung der Gl. (3) wurde seinerzeit aus den Ergebnissen der Modellversuche gefolgert, dass bei der vorgeschlagenen Bahnneigung von $1:7$ je nach Wasserstand mit Endgeschwindigkeiten von bis zu etwa $5,00$ m/s gerechnet werden kann. Die nunmehr vorliegenden Ergebnisse der Naturmessungen bestätigen diese Feststellung. Damit werden die in der Literatur empfohlenen Höchstgeschwindigkeiten (siehe Seite 13) vorliegendenfalls an der Hellingkante nicht überschritten, jedoch sei darauf hingewiesen, dass bei niedrigen Wasserständen die relativ grosse Absturzhöhe erhebliche Beanspruchungen des Schiffsrumpfes und der bereits vor dem Stapellauf eingebauten Maschinen hervorruft.

Bereits im Abschnitt 3 war auf die Gefahr des Verkantens und Festzwängens der Schlitten während des Ablaufs auf den Bahnen hingewiesen worden. Bei unseren Versuchen zeigte sich, dass bei der im Modell vorhandenen Anordnung der Schlitten und Ablaufbahnen ein Festzwängen nicht auftrat. Verschiedentlich war allerdings ein leichtes Verkanten festzustellen, indem ein Schiffsende beim Ablauf vorseilte und das andere entsprechend zurückblieb. Das führte dann zu einem ungleichförmigen Ablauf, da nach einem bestimmten Verdrehungswinkel nunmehr das andere Schiffsende vor-

eilte. Dieser Vorgang wiederholte sich auf der Länge der Ablaufbahnen meist mehrmals. Offensichtlich führt ein solcher Vorgang zu Geschwindigkeitseinbusse. Es konnte jedoch in keinem Falle festgestellt werden, dass ein solcher ungleichmässiger Ablauf auf den Bahnen zu irgendwelchen Havarien an der Hellingkante führte. Bei der grossen Zahl von Einzelversuchen blieb der genannte Vorgang auf einige Ausnahmefälle beschränkt; Ursache war wahrscheinlich ein ungleichmässiges Inbewegungsetzen des Schiffsmodells. Praktische Erfahrungen zeigen, dass dies auch in der Natur der Fall sein kann.

6.4 Rollwinkel

Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, betragen die bei den Modellversuchen gemessenen Rollwinkel ungünstigstenfalls

$$\varphi_1 \text{ (wasserseitig)} = 27^\circ$$

$$\varphi_2 \text{ (landseitig)} = 18^\circ$$

Ergänzend zu den Versuchen, deren Ergebnisse in der Tabelle zusammengestellt sind, wurden zwei Versuche unter ganz extremen Bedingungen durchgeführt. Dabei wurde das Schiffsmodell beim niedrigsten Wasserstand so aufgestellt, dass die Mittschiffsebene direkt über der Hellingkante stand. In dieser Lage wurde es durch Stopper festgehalten und dann - praktisch mit der Ablaufgeschwindigkeit Null - über das Ende der Ablaufbahn abkippen gelassen. Diese Versuche erfolgten bei der Bahnneigung 1:7 sowohl für 50 - als auch 70 %-ige Ausrüstung. Sie entsprechen dem Fall, dass das Schiff während des Stapellaufs durch widrige Umstände in Nähe der Hellingkante auf der Bahn stehengeblieben ist und wieder in Bewegung gebracht werden muss. Dieser Fall wäre auch praktisch evtl. denkbar, wenn auch nicht sehr wahrscheinlich. Auf jeden Fall wären es die ungünstigsten überhaupt möglichen Verhältnisse. Dieser Versuch bietet daher bedeutende Sicherheit für die aus den Modellversuchen zu ziehenden Schlussfolgerungen. Bei diesen Versuchen wurden folgende Werte gemessen:

$$\text{Ausrüstungsgrad } 50 \% : \varphi_1 = 46^\circ ; \quad \varphi_2 = 18^\circ$$

$$\text{Ausrüstungsgrad } 70 \% : \varphi_1 = 51^\circ ; \quad \varphi_2 = 20^\circ$$

Selbst unter diesen ungünstigen Verhältnissen richtete sich das Schiff sofort wieder auf. Es bestand weder die Gefahr des Kenterns, noch schlug das Schiff beim Rückschlingern gegen die Hellingkante. Sämtliche Versuche, sowohl mit Wasserständen über als auch unter OK. Bahn, zeigten, dass der Schiff-Schlitten-Komplex einwandfrei von der Helling freikam. Aus der Entfernung des Schiffes bei der ersten Rollschwingung (Spalte 7 der Tabelle 5) und dem Rückschlingewinkel φ_2 lässt sich der geringste Abstand der Schiffsaussenhaut (landseitige Scheuerleiste) von der senkrechten Kaiwand bestimmen, am besten graphisch. Er wurde ungünstigstenfalls zu rd. 3 m ermittelt. Dieser Wert ist nicht allzu gross, jedoch - wie die Versuche zeigten - ausreichend. Zum Vergleich werden bei Messungen auf einer sowjetischen Werft erhaltene Werte genannt [3]: Schiffshauptabmessungen L x B x H = 69 x 11,5 x 5,0 m; Stapellaufgewicht 600 Mp;

$\varphi_1 = 12^\circ$; $\varphi_2 = 8^\circ$; bei maximalem Krängungswinkel φ_1 befand sich die Mitschiffsebene in einem Abstand von ca. 6,5 m von der Hellingkante (dabei befanden sich die Stapellaufschlitten noch auf der Helling).

In unserem Fall wurden zwar grössere Rollwinkel gemessen, jedoch auch grössere Abstände von der Helling. Die Spalte 7 der Tabelle 5 wurde mit "Schwerpunkt Abstand" anstelle "Abstand der Mitschiffsebene" überschrieben, da sich die Messwerte auf den lotrecht über dem Schwerpunkt angebrachten Mast beziehen. Infolge ungleicher Massenverteilung tritt ein Gieren des Schiffes ein, indem nach Eintauchen in das Wasser sich das leichtere und wesentlich geringer eintauchende Vorschiff weiter von der Helling entfernt. Dies war bei unseren Versuchen im Gegensatz zu denen von DOUST jedoch noch nicht der Fall bei der ersten Rollschwingung (s. Abb. 2 c), so dass hier faktisch Schwerpunkt = Mitschiffsebene gesetzt werden kann. Damit wird gleichzeitig die Frage nach dem gegenseitigen Verkanten der Schiffsenden an der Hellingkante beim Verlassen der Bahn berührt. Trotz starker hecklastiger Vertrimmung war stets ein annähernd gleichmässiger Ablauf von der Hellingkante zu beobachten. Ein stärkeres Gieren des Schiffes trat erst nach dem Rückschlingern auf. Ferner war - wie auch aus den Abbildungen 9 bis 11 ersichtlich - nicht der gesamte Rollschwingungsvorgang

gleichzeitig mit einer hafenwärts gerichteten Translationsbewegung verbunden, sondern diese trat (zusammen mit dem Gieren) jeweils erst beim Abklingen des landseitigen Rückschlingerns ein (s. Abb. 2 c).

In Zusammenhang mit der Krängung des Schiffes muss auf das Übernehmen von Wasser hingewiesen werden (siehe z.B. Abbildungen 14 und 16). Das Schiffsmodell hatte zwar kein Schanzkleid, war aber an Deck wasserdicht abgeschlossen. In der Naturausführung wird das Schanzkleid noch etwas Wasser zurückhalten, jedoch ist es erforderlich, vor dem Stapellauf alle Öffnungen an Deck wasserdicht zu verschliessen; durch die Öffnungen im Schanzkleid muss das übergenommene Wasser wieder ohne Verzögerung abfliessen können.

In Abschnitt 6.3 war darauf hingewiesen worden, dass sich bei geringeren Reibungskoeffizienten in der Natur gegenüber den Versuchsergebnissen etwas höhere Ablaufgeschwindigkeiten ergeben können. Dadurch verringern sich die Rollwinkel. Bei systematischen Modellversuchen von DOUST [1] ergab sich für eine Geschwindigkeitserhöhung um je $1 \text{ ft/s} = 0,305 \text{ m/s}$ eine Verringerung von φ_1 zwischen $1,0$ bis $3,0^\circ$. Diese Werte dürften jedoch nicht allgemeingültig sein, sondern von den Stabilitätsverhältnissen des jeweiligen Schiffes abhängen. Der Einfluss der Ablaufgeschwindigkeit auf die Grösse der Rollwinkel wurde bei unseren Untersuchungen durch die Auswertung der Geschwindigkeitsschwankungen der Einzelversuche abzuschätzen versucht. Die Auswertung ergab fast einen umgekehrt proportionalen (linearen) Zusammenhang zwischen der Grösse der Ablaufgeschwindigkeiten und der Rollwinkel; im allgemeinen lag die prozentuale Abnahme der Rollwinkel jedoch etwas unter der Zunahme der Geschwindigkeiten. Für eine Geschwindigkeitserhöhung um je $1 \text{ ft/s} = 0,305 \text{ m/s}$ ergab sich sowohl für φ_1 als auch φ_2 eine Abnahme von rd. $0,8^\circ$, also etwas kleinere Werte als bei DOUST. Unter Ansatz dieser Werte dürften die in der Natur zu erwartenden Rollwinkel etwa noch 4 bis 5° kleiner werden, als zuvor bzw. in Tabelle 5 angegeben. Auf jeden Fall liegen die Modellversuchsergebnisse auf der sicheren Seite.

DOUST ermittelte bei seinen Versuchen für eine Vergrösserung der

Fallhöhe um je 1 ft = 0,305 m eine Erhöhung von φ_1 von 4 bis 7° und von φ_2 zwischen 1,5 und 4°. Vergleichsweise sei genannt, dass bei unseren Versuchen ein Einfluss der freien Fallhöhe (siehe Tabelle 6) auf φ_2 nicht festgestellt werden konnte; die Zunahme von φ_1 lag zwischen 0,75 und 1,5° je 1 ft bzw. 0,305 m Fallhöhenzuwachs.

6.5 Tauchtiefe

Die Tauchtiefe beim Stapellauf ist vor allem massgebend für die Tiefe der Stapellaufgrube.

Nach Tabelle 4 ist der Frosttrawler im teilausgerüsteten Zustand stark hecklastig vertrimmt. Der max. Tiefgang beträgt am hinteren Lot 4,11 m (gegenüber $T_{m_{KWL}} = 3,50$ m). Dieser Punkt des Schiffes (UK. Kiel bei Spant 0) würde sich also beim Stapellauf am meisten der Hafensohle nähern. Ein weiteres Kriterium wäre die Tauchung des Schiff-Schlitten-Komplexes. Bei fest mit dem Schiff verbundenen Schlitten entspricht die Schlittenvorderkante der maximalen Tauchtiefe. Die Annäherung der Schlittenvorderkante an die Hafensohle wird durch den Rollwinkel φ_1 beeinflusst. Bei Bedarf lässt sich aus der Tauchung des Schiffes und dem Rollwinkel die Tauchung der Schlittenvorderkante ermitteln, am zweckmässigsten auf zeichnerischem Wege.

Im vorliegenden Fall sind in der Naturausführung die Schlitten weder massiv noch fest mit dem Schiff verbunden, sondern Schlitten und Pallungen lösen sich nach dem Abkippen von der Bahn in ihre Einzelteile auf und lösen sich vom Schiff. Das entscheidendere Kriterium ist in diesem Fall nicht die Tauchung der Schlittenvorderkante, sondern der Unterkante Kiel. In der Tabelle 5 ist die Tauchtiefe beim Stapellauf, d.h. beim Eintauchen des Schiffes in das Wasser, dergestalt erfasst, dass die Tiefertauchung des Hecks gegenüber dem freidriftenden Zustand, bezogen auf die Schwimmwasserlinie bei 50 - bzw. 70 %-iger Ausrüstung, angegeben ist. Diese Tiefertauchung nimmt mit wachsender Fallhöhe erheblich zu. Gerade bei der grössten Fallhöhe sind beachtliche Schwankungen der Einzelwerte zu verzeichnen. Gegenüber den Mittelwerten von ungünstigstenfalls 1,60 m (bei 70 %-iger Ausrü-

stung) wurden Maximalwerte von 1,90 bis 2,00 m gemessen. In Anbetracht des Wertes des auf dem Spiele stehenden Objektes erscheint es hier angebracht, die Maximalwerte zu berücksichtigen. Bei in den letzten Jahren abgegebenen Gutachten, die zum grössten Teil auf den Ergebnissen grossmaßstäblicher Modellversuche basierten, hat die Forschungsanstalt in Anlehnung an international gebräuchliche Richtwerte für grosse und wertvolle Schiffe noch 1,00 m Wasser unter dem Kiel (in Seekanälen, Fährbetten u.ä.) gefordert. Damit ergibt sich die erforderliche Wassertiefe wie folgt:

Tiefgang T_h	= 4,11 m
max. Tiefertauchung	= 2,00 m
Flottwasser	= 1,00 m
Sa.	= 7,11 m

Bei einem niedrigsten Wasserstand von + 2,73 m müsste demnach die Sohle der Stapellaufgrube auf + 2,73 - 7,11 = - 4,38 m liegen. Bei den Modellversuchen lag die Sohle auf - 4,70 m, also noch etwas tiefer. Diese Tiefe war vor Durchführung der Versuche überschläglich berechnet und bewusst etwas an der oberen Grenze der Richtwerte angenommen worden, da aus modelltechnischen Gründen (Sohle = massive Hallensohle) im Bedarfsfall keine spätere Vertiefung möglich war. Auf eine spezielle Versuchsreihe mit der nach Auswertung der Versuche als erforderlich ermittelten Tiefe von 4,40 m konnte verzichtet werden, da nach der in Abschnitt 3 behandelten qualitativen Analyse der nur geringe Unterschied in der Wassertiefe keine weiteren Auswirkungen erwarten lässt.

Es verdient Beachtung, dass die Untersuchungen für Tiefgangsverhältnisse durchgeführt wurden, wie sie sich aus den Gewichtskurven der Abb. 6 ergeben. Wie bereits mehrfach erwähnt, tritt dabei stark hecklastige Vertrimmung ein. Diese kann durch Ballast im Vorschiff gemindert werden. Auf diese Weise könnte die Tauchung und damit die erforderliche Wassertiefe etwas verringert werden. Die Modellversuche wurden unter den ungünstigsten möglichen Bedingungen durchgeführt; dafür erwies sich die im Modell untersuchte Stapellaufgrube als ausreichend. Es ist nicht zu empfehlen,

diese Abmessungen wesentlich zu unterschreiten.

Ein zumindest teilweises Austrimmen vor dem Stapellauf durch Ballast ist auf jeden Fall im Interesse der Vergleichsmässigung der Belastung und damit des gesamten Ablaufvorganges zu begrüssen.

Abschliessend wird die von uns ermittelte für den Stapellauf erforderliche Wassertiefe mit Literaturangaben verglichen:

VLIG [10] führt an, dass "die notwendige Wassertiefe nur wenig mehr als der grösste freidriftende Ablauftiefgang zu betragen braucht". Unsere Zusammenstellung der Versuchsergebnisse zeigt, dass dies nur für kleine Fallhöhen richtig ist; bei grösseren Fallhöhen erreicht die Tiefertauchung gegenüber dem freidriftenden Zustand beachtliche Werte. Bereits bei der Darstellung der Fallhöhen war darauf hingewiesen worden, dass VLIG aus der niederländischen Praxis nur geringe Höhen nennt.

Nach DOUST und MACDONALD [2] "ist bemerkenswert, dass die für einen zufriedenstellenden Querstapellauf erforderliche Wassertiefe ... die Grösse des doppelten statischen Tiefganges des Schiffes, der sich nach Stapellauf ergibt, hat".

Im "Grundbau-Taschenbuch" [16] findet sich ein entsprechender Hinweis für den Stapellauf von Schwimmkästen: "Sind die Laufbahnen zu kurz (um ein Aufschwimmen zu erreichen), so fällt der Kasten am Ende der Laufbahnen plötzlich in die Tiefe und taucht dabei tiefer ein, als mit seinem normalen Tiefgang übereinstimmt. Die Wassertiefe muss hierzu ausreichend sein und, wenn keine besondere Berechnung erfolgte, mindestens den doppelten Tiefgang des Kastens betragen. Auch die schräg abwärts gerichtete Ablaufgeschwindigkeit ist Ursache, dass die Kästen tiefer als bei normalem Tiefgang eintauchen. ... Für genauere Berechnungen ist der ganze Vorgang wenig geeignet. ... Auch hier sind darum Modellversuche sehr am Platze".

Die Elbe-Werft Boizenburg wies darauf hin, dass in gemeinsamen Besprechungen mit dem Institut für Schiffbau notwendige Wassertiefen gleich dem 1,6- bis 1,7-fachen "der Tauchtiefe des stapellauffertigen Schiffes" genannt wurden.

Aus dem von uns auf Grund der Versuchsergebnisse ermittelten Wert

ergibt sich, bezogen auf den Tiefgang am hinteren Lot, das Verhältnis zu

$$\frac{7,11}{4,11} = 1,73$$

und liegt damit grössenordnungsmässig im Bereich der Literaturangaben.

6.6 Auslaufweg

Nach Abb. 5 beträgt die Sohlbreite der im Modell untersuchten Stapellaufgrube rd. 12,50 m und die obere Breite 27,00 m. Bei den Versuchen wurden Auslaufwege von 20 bis 25 m, gerechnet ab Hellingkante, gemessen. Die angenommenen Abmessungen der Stapellaufgrube erwiesen sich im allgemeinen als ausreichend. Nur bei dem niedrigsten Wasserstand von + 2,73 m stiess die Schlittenvorderkante des bugwärtigen am Schiff befestigten Schlittens zuweilen leicht an die Böschung der Grube. Hierfür gilt gleichfalls das bereits im vorausgegangenen Abschnitt bezüglich der Wassertiefe Gesagte: in der Naturausführung lösen sich die Schlitten vom Schiff. Bei analoger Versuchsanordnung im Modell, wo sich das Schiff beim Verlassen der Hellingkante ebenfalls vom Schlitten löste, waren die Abmessungen der Stapellaufgrube in jedem Fall ausreichend. Die Böschungsneigung richtet sich allerdings nach der Standfestigkeit der Flußsohle. Sollte evtl. eine flachere Neigung als 1:3 erforderlich werden, darf dadurch nicht der Querschnitt der Grube verkleinert werden. Dann müsste von der Sohlenbreite ausgegangen und die obere Breite entsprechend der flacheren Neigung grösser werden.

Nach PIENKAWA [8] "genügt als Beckenbreite die 1,5-fache Breite des Schiffes", nach Vlieg [10] "genügt ein Kanal, der zweimal so breit als das Schiff ist"; DOUST [1] nennt Verhältniszahlen zwischen 1,5 und 2,5. Auch hier liegen unsere Versuchsergebnisse mit

$$\frac{20}{10} \text{ bis } \frac{25}{10} = 2,0 \text{ bis } 2,5$$

wieder im Bereich der Literaturangaben.

6.7 Schwallwelle

In der Tabelle 5 wurde die Höhe der Schwallwelle an dem der Helling gegenüberliegenden Ufer über dem ruhenden Wasserspiegel angegeben. Die Schwallwelle entsteht, indem das Schiff beim Eintauchen in das Wasser eine bestimmte Wassermasse verdrängt; dem Schwall folgt ein entsprechender Sunk nach. Die Sunktiefen sind in der Tabelle nicht enthalten, sie betragen bei einem Ausrüstungsgrad von 50 % bei allen Wasserständen rd. 0,50 m und bei einem Ausrüstungsgrad von 70 % rd. 0,65 m. Wie aus Abb. 15 ersichtlich, wirkt sich die Welle im wesentlichen nur im Bereich unmittelbar gegenüber der Helling aus; die sich seitlich im Hafen ausbreitenden Ausläufer sind nur geringfügig. Unmittelbar gegenüber der Helling muss bei den auftretenden Wellenhöhen das Ufer befestigt werden, am zweckmässigsten durch eine kräftige Steinschüttung auf guter Filterschicht; bei Bedarf lässt sich diese Ausführung leicht und ohne grösseren Aufwand instandsetzen.

6.8 Kräfte an der Hellingkante

In der Fachliteratur wird hervorgehoben, dass beim Querstapellauf im Verhältnis zum Längsablauf wesentlich geringere örtliche Kräfte auftreten und die Hellingungen entsprechend leichter ausgeführt werden können, siehe z.B. [8] und [10]. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass beim Entwurf von Querhellingungen insbesondere der Belastung der Hellingkante Aufmerksamkeit zu widmen ist. Ausser der senkrechten Belastung ist auch die in Richtung der Bahnneigung wirkende Reibungskraft zu berücksichtigen.

Die an der Hellingkante auftretende senkrechte Last (Druckkraft) erreicht ihren grössten Wert beim Abkippen des Schiffes bzw. Schiff-Schlitten-Komplexes. Bei höheren Wasserständen und entsprechender Überstauung der Ablaufbahn wird noch ein Teil der sich aus dem Schiffsgewicht ergebenden Last durch den beim Eintauchen in das Wasser auf den vorderen Teil des Schiff-Schlitten-Komplexes wirkenden Auftrieb kompensiert. Bei niedrigen Wasserständen, wesentlich unter Helling- bzw. Bahnkante, entfällt der Auftrieb, und die aus dem Stapellaufgewicht resultierende Belastung muss allein von der Helling aufgenommen werden. Dabei

würde nach statischen Überlegungen ungünstigstenfalls das gesamte Stapellaufgewicht als senkrechte Hellingkantenbelastung auftreten [13], [16]. Abweichungen davon können sich, auch bei unter Wasser liegenden Ablaufbahnen, durch den dynamischen Charakter des Stapellaufvorganges ergeben. LATES hat bei seinen Modellversuchen die Hellingkantenbelastung mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen gemessen; seine Ergebnisse liefern einige Hinweise über die Grösse der unter Berücksichtigung der dynamischen Einflüsse anzusetzenden Kräfte und werden daher nachstehend auszugsweise zitiert [4]:

"Die maximale senkrechte Belastung infolge des Schiff-Schlitten-Komplexes auf der Hellingsschwelle (Holm) ist auf den gleichzeitigen Einfluss des Eigengewichtes des Schiffes und der Schlitten, auf den Auftrieb und auf die Reibung zwischen den Gleitschlitten und der Schwelle zurückzuführen. Das Phänomen ist ziemlich komplex, weil sich im Verlaufe der Drehung auf der Hellingkante die Reaktionsrichtung im Verhältnis zur Position des Schiff-Schlitten-Komplexes verändert. Am Modell wurden nur die Werte der senkrechten Komponente der Kantenbelastung ermittelt. Die waagerechte Komponente kann in der Berechnung so angenommen werden, als sei sie gleich der waagerechten Projektion der Reibungskraft $G \cdot \mu \cdot \cos \alpha$ (wobei G das Gesamtgewicht des Komplexes beim Stapellauf ist, ferner μ der Reibungskoeffizient im unteren Bahnbereich). Der Einfluss des Auftriebs auf die Reibungskraft, in dem Sinne, dass er sie verringert, kann dadurch in Betracht gezogen werden, dass man die Wassertiefe über der Hellingkante mit dem Tiefgang des Schiffes auf den Schlitten vergleicht und den dazugehörigen Auftrieb einführt. Im allgemeinen tritt die maximale Belastung der Hellingkante bei niedrigem Wasserstand auf, wo also der Auftrieb nicht einwirkt. Der Einfluss der Reibungskoeffizienten auf die maximale senkrechte Belastung ist ziemlich gross, weil sich beim Bremsen auf der Vorhelling ein Teil der kinetischen Energie des Schiffes in die mechanische Arbeit der Schwellenverformung umwandelt. So erklärt es sich auch, weshalb die maximale senkrechte Belastung der nicht getauchten Hellingkante oder derjenigen, die sich nur ca. 1,00 bis 1,50 m unter Wasser befand, einen durchschnittlich um 15 % grösseren Wert hatte, als das Eigengewicht des Komplexes beim Stapellauf betrug.

Unter Vernachlässigung des hydrodynamischen Widerstandes des Wassers und unter der sich damit deckenden Annahme, dass das Bremsen bei niedrigem Wasserstand allein schon die Verringerung der Geschwindigkeit vom Maximalwert auf den an der Kante verursacht, führen die orientierenden Berechnungen angenähert zu den am Modell experimentell erzielten Werten für die maximale senkrechte Belastung, ... Befindet sich die Hellingkante tiefer als 1,50 m unter dem Wasserspiegel, so sinkt die maximale senkrechte Belastung äusserst schnell und fast linear mit der weiteren Erhöhung des Wasserspiegels und kann so bis zu nur 25 bis 30 % des gemessenen Maximalwerts gelangen".

7. Schlussbemerkungen

Auf Grund der Ähnlichkeitsgesetze und unter Beachtung der geringfügigen modellbedingten Abweichungen der Reibungskoeffizienten ergeben die durchgeführten Modellversuche ein angenähertes Bild über das Verhalten des teilausgerüsteten Frosttrawlers beim Querstapellauf. Die Untersuchungen liefern die Unterlagen für die Projektierung der Helling sowie für die ordnungsgemässe Vorbereitung und Durchführung des Stapellaufs.

Bei den Modellversuchen konnten nur die hydrodynamischen Probleme des Querstapellaufs untersucht werden. Bei niedrigen Wasserständen dürfte die relativ grosse Fallhöhe erhebliche Beanspruchungen des Schiffsrumpfes und der bereits vor dem Stapellauf eingebauten Maschinen hervorrufen. Die Untersuchung dieser Beanspruchungen, wofür die Modellversuche Anhaltspunkte bzw. Ausgangswerte liefern, gehört in das Gebiet der Schiffsfestigkeit.

Neben der Schaffung von quantitativen Unterlagen für den konkreten praktischen Fall stellen die Ergebnisse der Modellversuche eine weitere Bereicherung der wissenschaftlichen Erkenntnisse auf dem Gebiet des Querstapellaufs dar. U.a. konnten verschiedene bereits in der Literatur erwähnte Richtzahlen bestätigt und z.T. auch deren Gültigkeitsbereich angegeben werden. Die erfolgte Ausarbeitung einer zweckmässigen und für wissenschaftliche Untersuchungen evtl. noch zu verfeinernden Versuchsmethode schafft die Möglichkeit, bei Bedarf weitere Modellversuche über den Querstapellauf

durchzuführen.

Es ist anzustreben, bei weiteren Stapelläufen in der Natur entsprechende Messungen durchzuführen, um die Aussagekraft der Untersuchungen zu erhöhen und durch Vergleich der Natur- und Modellergebnisse weitere Ähnlichkeitsbetrachtungen zu ermöglichen.

Wie jede umfangreichere experimentelle Arbeit, so ist auch die vorliegende das Ergebnis einer Gemeinschaftsarbeit. Die wissenschaftlich-technische Gesamtleitung sowie die Auswertung der Untersuchungen und deren berichtsmässige Zusammenstellung lag in Händen von Dipl.-Ing. Glazik, während die technische Vorbereitung der Versuche Dipl.-Ing. Pohl oblag. Gedankt sei an dieser Stelle allen beim Aufbau der Versuchsanlage und bei der Durchführung der Versuche beteiligten Handwerkern der Versuchsanstalt Potsdam.

Abschliessend dankt die Forschungsanstalt dem Institut für Schiffbau und der Elbe-Werft Boizenburg für die kollegiale Zusammenarbeit bei der Vorbereitung der Untersuchungen sowie für die Überlassung von Messergebnissen der Werft.

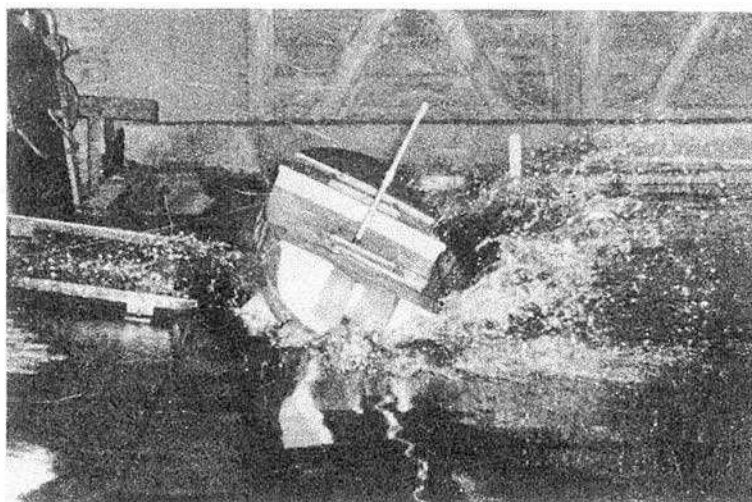


Abb. 14: Modell-Stapellauf
Phase: Rollwinkel φ_1 (wasserseitig)

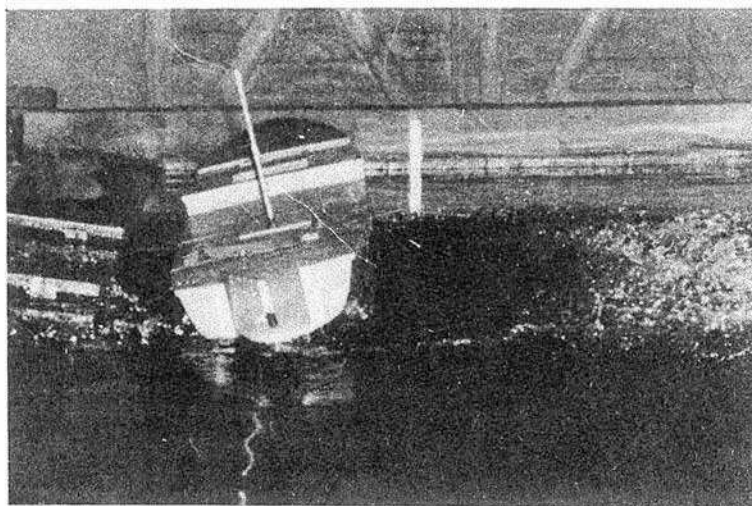


Abb. 15: Modell-Stapellauf
Phase: Rollwinkel φ_2 (landseitig)

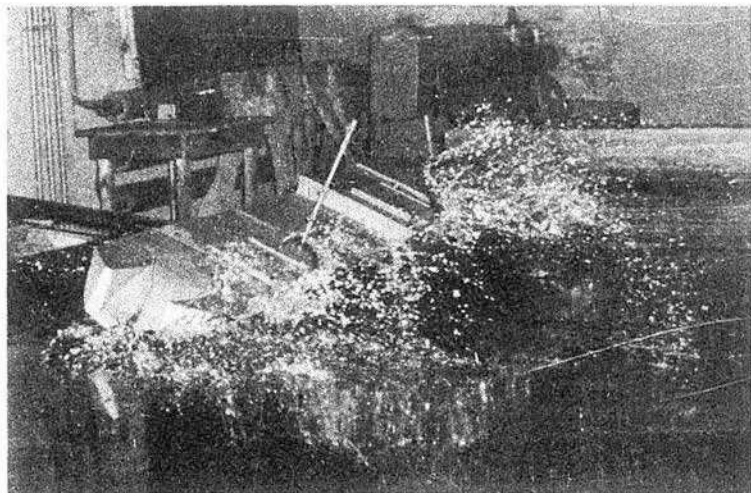


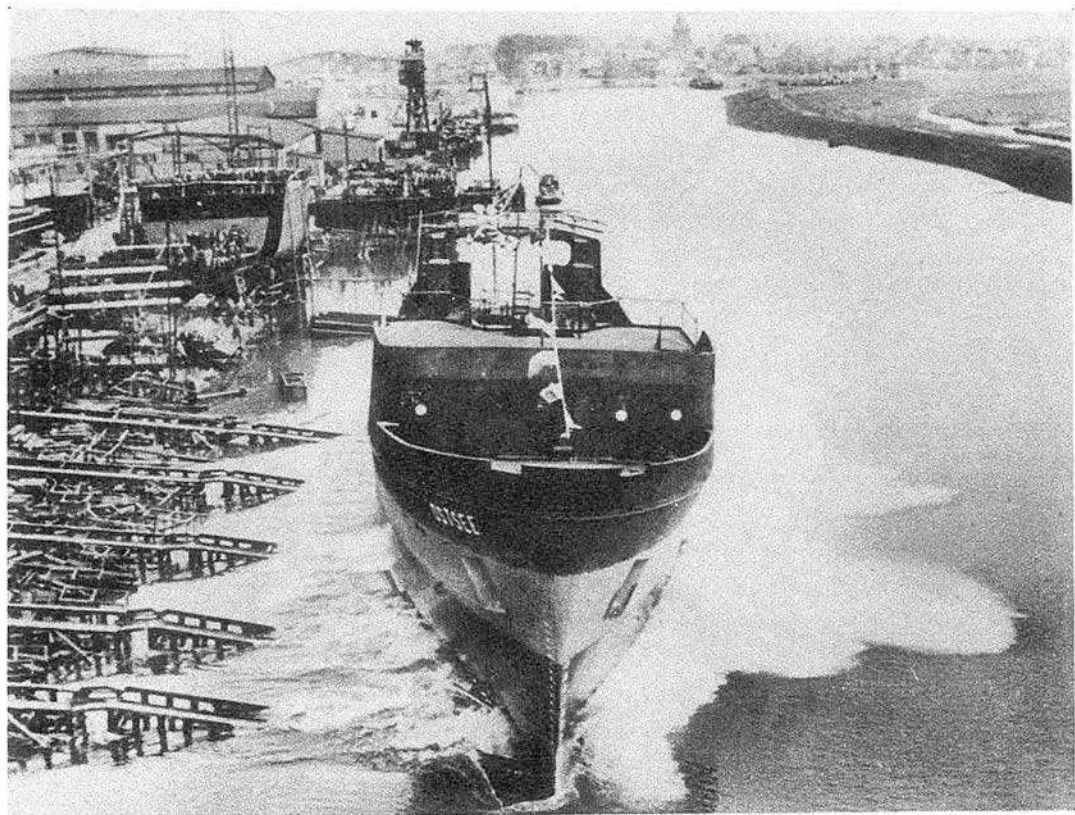
Abb. 16: Modell-Stapellauf
Phase: Rollwinkel φ_1

Zu Abb. 14 bis 16:

Ausrüstungsgrad = 50 %

Bahnneigung = 1:7

Wasserstand = MW



(Foto: Zentralbild)

Abb. 17: Querstapellauf des ersten Frosttrawlers auf der Elbe-Werft-Boizenburg am 30. April 1965

Literaturverzeichnis

- [1] DOUST: Der Querstapellauf von Schiffen unter besonderer Berücksichtigung von Trawlern. "Shipbuilder and Mar. Eng. Builder", London, 62 (1955) 563, S. 250 - 253.
- [2] DOUST u. MACDONALD: Weitere Versuche zum Querstapellauf, Serien 2 und 3. "Shipbuilding and Shipping Record", London, 90 (1957), S. 105 - 107.
- [3] GUNDOBIN u. OLENICEV: Erfahrungen beim Querstapellauf von Schiffen. "Sudostroenie", Leningrad, 30 (1964), S. 42 - 44.
- [4] LATES: Experimentelle hydrodynamische Modelluntersuchungen über den Querstapellauf eines Frachters mit hoher Tonnage. "Studii de hidraulica experimentală", Institutul de Studii si Cercetari Hidrotehnice (ISCH), Bukarest 1959, S. 220-261.
- [5] LATES: Beobachtungen über die Ähnlichkeit des Querstapellaufs von Schiffen auf einer Helling mit getauchter Vorhelling. "Hidraulica albiilor si a constructiilor", II, ISCH, Bukarest 1960, S. 139 - 143.
- [6] LATES: Der hydrodynamische Widerstand beim Querstapellauf von Hochseeschiffen auf einer Helling mit getauchter Vorhelling. "Studii de hidraulica", V, ISCH, Bukarest, 1963, S. 227 - 239.
- [7] LJACHNITZKIJ: Hydrotechnische Hafenbauwerke. Bd. II; Verlag Binnenschifffahrt, Leningrad 1955.
- [8] PIENKAWA: Querstapellauf eines 500-ton-Trawlers auf Rollen. "Budownictwo Okretowe", Warschau, 1 (1956) 11/12, S. 262 - 265.
- [9] THODE: Querstapelläufe, insbesondere bei Trawlern. (Auszug aus einem Vortrag von DOUST, s. [1]).
- [10] VLIG: Einiges über den Querstapellauf von Schiffen. "Schip en Werf", Rotterdam, 26 (1959), Nr. 9, S. 278 - 282 und Nr. 11, S. 342-344.

- [11] VLIG: Querschiffs-Stapellauf besonderer Art von grossen Schiffseinheiten.
"Schip en Werf", Rotterdam, 26 (1959)
Nr. 16, S. 492 - 493.
- [12] VLIG: Querstapellauf von grossen Schiffen.
"Schip en Werf", Rotterdam, 26 (1959),
Nr. 21, S. 642 - 647.
- [13] VÖLKER: Die Berechnung des Querstapellaufs.
"Hansa", Hamburg, 86 (1949), Nr. 43,
S. 1045-1046 und Nr. 44/45, S. 1101-1104.
- [14] -- Querstapellauf.
"Ship and Boat Builder and Marine Trader",
London, 14 (1961), 1 S. 90 - 91.
- [15] -- Schiffbautechnisches Handbuch.
Herausgegeben von W. HENSCHKE, Bd. 1,
2. Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin 1957.
- [16] -- Grundbau-Taschenbuch.
Band I; Verlag von Wilhelm Ernst u. Sohn,
Berlin 1955.
- [17] -- VEB Elbe-Werft Boizenburg, Stapellauf des
ersten Serien-Frosttrawlers am 30. April
1965.
"Schiffbautechnik", Heft 6/1965, S. 285.

2) 10 626.134 Dichtung des Kanalbores
: 691.16 : Bituminöse Baustoffe

Experimentelle Untersuchungen über die Absonderung
von Phenol aus bituminösen Uferbefestigungen

Dipl.-Ing. Günter Glazik und
Ing. Wolfgang Bürger

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Aufbau der Versuchsanlage und Versuchsdurchführung
3. Betrachtungen über den Phenolabbau im Wasser
4. Versuchsergebnisse
5. Diskussion der Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung des Phenolabbaues
6. Abschätzung der praktischen Auswirkungen
7. Zusammenfassung

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten haben in zunehmendem Maße Asphaltbauweisen Eingang in den Wasserbau gefunden. Die im Wasserbau verwendeten Asphaltbauweisen gehen zum großen Teil auf Erfahrungen im Straßenbau zurück. Die vom Wasserbau gestellten Anforderungen sind jedoch meist andere als beim Bau von Straßen. Asphalt wird im Wasserbau zwar vielfach nach den Grundsätzen der im Straßenbau üblichen Bauweisen angewendet, jedoch entwickelten sich mit fortschreitender Erfahrung spezielle Bauweisen für Wasserbauzwecke. An zahlreichen Wasserbauwerken haben sich Asphaltbauweisen bewährt; für bestimmte Zwecke bringen sie gegenüber den bisher üblichen Bauweisen sowohl technische als auch ökonomische Vorteile. Die Entwicklung auf diesem Gebiet ist noch keineswegs abgeschlossen. Um Fehlschläge zu verhüten, ist es erforderlich, daß sich sowohl der planende als auch der bauausführende Ingenieur gründlich mit den speziellen Bedingungen der jeweiligen Bauaufgabe auseinandersetzen und die dafür geeignetste Bauweise auswählen bzw. entwickeln.

Über die Anwendung von Asphalt im Wasserbau liegt gerade aus den letzten Jahren ein sehr umfangreiches Fachschrifttum vor. Jedoch sind bisher kaum Untersuchungen über die Auswirkung der bituminösen Baustoffe auf die Wasserqualität bekannt geworden. Vom Arbeitskreis "Asphaltbauweisen" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau wurde ein umfangreiches Schrifttumsverzeichnis herausgegeben [17], jedoch finden sich dort keine Publikationen zu dem Problem der Beeinflussung der Wasserqualität. Mit der zunehmenden Verschmutzung unserer Wasserläufe erfordert jedoch diese Frage besondere Beachtung. Sie wurde daher auch aufgeworfen, als vor einigen Jahren mit der Einführung von Asphaltbauweisen im Bereich der Wasserstraßenverwaltung der DDR begonnen wurde (Bau von Deckwerken und Buhnen).

Da es sich dabei größtenteils um Unterhaltungsarbeiten mit entlegeneren Baustellen kleinen Umfangs handelte, wurde aus technologischen Gründen auch auf kaltverarbeitbare Massen unter Verwendung von Bitumenemulsionen zurückgegriffen. Trotz der wirtschaftlichen Vorteile sind diese Bauweisen umstritten. So schreibt z.B. ZITSCHER: "Es kann allgemein festgestellt werden,

daß es bis heute noch nicht gelungen ist, kalteinbaufähige Massen herzustellen, die dem Heißeinbauverfahren ebenbürtig sind [19]." Und MÖSSLANG, welcher bereits vor über 35 Jahren an der Entwicklung der Asphaltbauweisen im Wasserbau beteiligt war [7], schreibt in einem Aufsatz neustens Datums: "Man kann sagen, Asphalt heiß gemischt, fachgerecht eingebaut und verdichtet, hat sich in allen Arten bewährt und erfüllt die an ihn gestellten Aufgaben völlig. Ausführungen mit manipulierten Bindemitteln müssen immer noch in den Bereich der Entwicklung verwiesen werden [14]." Die im Bereich unserer Wasserstraßenverwaltung ausgeführten Versuchsbauten mit kalteinbaufähigen Massen haben sich bisher im allgemeinen bewährt, auch deshalb, weil kein dichter Belag gefordert wurde. Allerdings sind offene Beläge dadurch gefährdet, daß das eindringende Wasser die Neigung hat, die Bitumenhaut von der Oberfläche der Mineralkörner zu verdrängen. Dabei kommt es wesentlich auf die Art des Bindemittels sowie auf die Art und Beschaffenheit der mineralischen Zuschlagstoffe an. In dieser Hinsicht sind kaltverarbeitbare bituminöse Bindemittel den heißverarbeitbaren unterlegen [8]. Durch Freilandversuche in der Versuchsanstalt Potsdam der Versuchsanstalt sowie Auswertung praktischer und in der Fachliteratur niedergelegter Erfahrungen konnten Hinweise für die Verbesserung der Beständigkeit der kalteinbaufähigen Massen gegeben werden.

Diese technologischen Fragen wurden hier nur der Vollständigkeit halber und zur Charakterisierung der Bauweise erwähnt. Speziell zum Thema der Beeinflussung der Wasserqualität werden jedoch durch die Verwendung kalteinbaufähiger Massen unter Benutzung von Bitumenemulsionen ernsthafte Fragen aufgeworfen, wenn z.B. DEMPWOLFF im "Bitumen- und Asphalt-Taschenbuch" [6] schreibt: "Das Bitumen enthält keine wasserlöslichen oder giftigen Stoffe. Deswegen ist Asphalt für alle Aufgaben der Wasserfassung, Reinigungsbecken, Rohrleitungen und Grabenbefestigungen der Trinkwasserversorgung, der Beregnungen und Bewässerungen geeignet. In Deutschland ist es üblich, die Verschnittbitumen mit Teeröl zu verschneiden. Auch gewisse Bitumen-Spezialemulsionen enthalten Teeröle. Deshalb verbietet sich die Anwendung dieser Bindemittel für den Asphaltwasserbau, um auf jeden Fall eine Verunreinigung des Wassers zu vermeiden." Ähnlich äußert sich MAROTZ [13],

indem er darauf hinweist, daß eine "Empfehlung der Bundesanstalt für Gewässerkunde vorliegt, die eine Gefährdung des Fischbestandes der Gewässer durch die im Teer enthaltenen Spuren von Phenolen befürchtet und deshalb von einer Verwendung von Teer abrät." Eine Nachfrage ergab jedoch, daß es sich dabei nicht um publizierte Empfehlungen oder Richtlinien handelt, denen evtl. quantitative Untersuchungen vorausgegangen sind.^{x)} Andererseits ist in jüngster Zeit MÖSSLANG in seinem bereits erwähnten Aufsatz [14] auch auf die Frage "Teer oder Bitumen" eingegangen, wobei er u.a. schreibt: "In den Entwicklungsjahren des Asphaltwasserbaues ... enthielten die damaligen Teere noch Anteile an leichtflüchtigen und zum Teil wasserlöslichen Ölen, wie z.B. Phenolen. Diese von der Fischerei in Gewässern höchst ungern gesehenen Verunreinigungen schlossen die Teere aus dem Wasserbau aus." Beachtlich ist der dann folgende Hinweis: "Die Phenolgefahr scheint praktisch gebannt. Teer kann also interessant werden, vor allem dann, wenn sich für bestimmte Zwecke Vorzüge herausfinden lassen, vielleicht gerade für Unterwasserarbeiten."

Diese kurze Übersicht zeigt einmal, daß trotz aufgeworfener Fragen über die Beeinflussung der Wasserqualität durch bituminöse Bauwerke infolge Absonderung von Phenol keine allgemein bekannten quantitativen Untersuchungsergebnisse vorliegen. Zum anderen zeigt sie, daß auch keine Klarheit über die evtl. Schädlichkeit von Verschnittbitumen und Bitumenemulsionen bzw. Teer vorhanden ist, welche in bestimmten Fällen durchaus technologische Vorzüge haben können.

Um Einblick in den Grad der Phenolabsonderung der in unserer Wasserstraßenverwaltung versuchsweise eingesetzten kaltverarbeitbaren bituminösen Massen zu gewinnen, wurden in den Jahren 1964/65 in der Versuchsanstalt Potsdam der Forschungsanstalt diesbezügliche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Es liegt - wie noch aus den weiteren Ausführungen hervorgehen wird - in der Materie begründet, daß diese Versuche gewisse Unzulänglichkeiten

^{x)} Für diese Auskunft sei Herrn Dr. Kothé, Hydrobiologe an der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz, gedankt.

aufweisen. Aus diesem Grunde haben sich die Verfasser nur zögernd zu einer Veröffentlichung entschlossen. Den Ausschlag dazu gaben dann jedoch Diskussionen mit Hydrobiologen und Hydrochemikern sowie die eingangs erwähnte Tatsache noch wesentlicher offener Fragen und ihre bisher nur unzureichende Behandlung in der Fachliteratur.

In diesem Sinne sehen wir die Veröffentlichung gerechtfertigt mit denselben Worten, wie sie BACH seinerzeit einer der ersten Publikationen über den Phenolabbau im Wasser voranstellte: "Wir haben, wie ich glaube, einen ersten tastenden Versuch gemacht, um die Klärung dieser Frage auf Grund analytischer Prüfungen in die Wege zu leiten und möchten die Ergebnisse dieses ersten Versuches hier mitteilen, weil er trotz der Unvollkommenheit der Anstellung immerhin schon einige bemerkenswerte Ergebnisse lieferte [1]."

2. Aufbau der Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

Für die Versuche stand ein rechteckiger Stahlblechbehälter von 4,0 m Länge, 1,0 m Breite und 0,90 m Höhe (Abbildung 1) zur Verfügung. Um den Wasserzutritt möglichst naturgetreu zu gestalten, wurde in den Behälter ein Ausschnitt aus einer Böschung mit einer der Naturausführung entsprechenden Böschungsbefestigung eingebaut. Untersucht wurden drei verschiedene bituminöse Massen:

Probemasse I

Mischgut aus Splitt der Körnung 3 bis 8 mm und einer Verschnitt-bitumen-Emulsion zur Kaltverarbeitung; Mischungsverhältnis 1:2, Einbau in einer Lage von 8 cm Dicke. Den bituminösen Anteil der Emulsion bildet ein gefluxtes Bitumen der Sorte B 200.

Probemasse II

wie Masse I, jedoch unter Verwendung einer Bitumenemulsion einer anderen Fertigungscharge.

Probemasse III

Mischgut aus Splitt und Kies sowie Kalt-Bitumen KB 200 mit Haftverbesserer. Einbau in drei Lagen mit insges. 7,8 cm Dicke. Die Zuschlagstoffe bestehen bei der

1. (untersten) Lage aus Splitt 15/30, bei der
2. Lage aus Splitt 8/15 und bei der
3. (obersten) Lage aus Kies 0/3 und 3/5 mm.

Als Unterlage für den bituminösen Belag diente in jedem Falle eine Splittschicht. Das Mischgut wurde im Trockenen eingebaut und mit einem Handstampfer verdichtet. Bei der Probemasse III wurde an drei aufeinanderfolgenden Tagen je eine Lage eingebaut. Bei allen drei Probemassen stand die fertige Böschungsbefestigung noch 6 Tage trocken, so daß eine Erhärtung erfolgen konnte. Die durchschnittlichen Lufttemperaturen während der Zeit des Einbaus und der Erhärtung betrugen 15°C .

Nach der Frist von 6 Tagen wurde der Versuchsbehälter mit Wasser aus dem Sakrow-Paretzer-Kanal gefüllt. Die Wassertiefe betrug 0,72 m. Die Böschung lag völlig unter Wasser. Es wurde damit der Zustand einer bituminösen Böschungsbefestigung in einem stehenden Gewässer geschaffen. In der darauffolgenden Zeit wurden mittels eines Entnahmegerätes ^{x)} in gewissen Zeitabständen Wasserproben aus dem Versuchsbehälter entnommen. Die Entnahme der Proben erfolgte 0,36 m über der Behältersohle - also in halber Wassertiefe - und bis auf einige Untersuchungen, welche die Konzentrationsverteilung im Behälter zeigen sollten, senkrecht über dem Böschungsfuß. Der zeitliche Abstand der Probeentnahmen wurde mit zunehmender Versuchsdauer vergrößert.

Die Wasserproben wurden in 1-l-Flaschen mit eingeschliffenen Glasstöpseln abgefüllt, konserviert und zur Analysierung, speziell zur Feststellung des Phenolgehaltes, dem chemischen Labor der Abt. Grundbau der Forschungsanstalt zugeleitet ^{xx)}.

Nachdem ein Konstantbleiben oder gar Absinken des Phenolgehaltes im stehenden Wasser festgestellt wurde, galt es zu untersuchen, ob bei strömendem Wasser die Absonderung von Phenol nochmals ansteigt. Zu diesem Zwecke wurde auf den Behälter ein mit einem Schrauben-Propeller starr gekoppelter Elektromotor als Rührwerk aufgesetzt. Die sich bildende Strömung traf mit einer Geschwin-

^{x)} Schwebstoffentnahmegerät der FAS, Beschreibung s. [5].

^{xx)} Für die Ausführung der Wasseruntersuchungen sei an dieser Stelle der Chemikerin Frl. G. Becher gedankt.

digkeit von etwa 0,85 m/s auf die Böschung auf. Nach dem Rührbeginn wurden wiederum Wasserproben entnommen.

Grundsätzlich muß festgestellt werden, daß die bei der Phenolbestimmung ermittelten Versuchswerte nicht direkt die Menge des aus dem bituminösen Belag abgesonderten Phenols wiedergeben, sondern nur die im Versuchswasser vorhandene Phenolkonzentration. Über die Phenolabsonderung aus der bituminösen Masse selbst läßt sich nichts aussagen, da dieser Vorgang durch den Phenolabbau im Wasser überdeckt wird. Die Deutung der Versuchsergebnisse erfordert daher eine nähere Betrachtung des Problems des Phenolabbaues.

3. Betrachtungen über den Phenolabbau im Wasser

Hierüber sind in der Vergangenheit eine Reihe von experimentellen Untersuchungen angestellt worden, ohne daß dieses Problem bisher restlos geklärt wurde. So stellt z.B. MEISSNER [15] fest: "Man hat heute zwar einen Einblick in die Vorgänge der biologischen Zerstörung der Phenole gewonnen, aber im ganzen gesehen sind die Ergebnisse doch noch sehr lückenhaft." Auch in neueren monographischen Veröffentlichungen [3], [15] wird noch auf Ergebnisse etwa 30 bis 35 Jahre zurückliegender Versuche [1], [2], [10], [11] zurückgegriffen. Abgesehen von je einem Beitrag von MEISSNER [15] sowie MACKIEWICZ-GOLACHOWSKA [12] sind in der Zwischenzeit kaum wesentliche neue Ergebnisse hinzugekommen. Zu einer näheren Unterrichtung wird auf die zitierten Veröffentlichungen verwiesen, aus denen zahlreiche Einzelheiten der Untersuchungen entnommen werden können, so u.a. tabellarische Zusammenstellungen und graphische Darstellungen über den zeitlichen Verlauf des Phenolabbaues.

Die aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse vermitteln uns folgendes Grundsätzliche zu diesem Fragenkomplex.

Der Abbau der Phenole im Wasser (auch Phenolschwund, -zersetzung, -zerfall oder -vernichtung genannt) geschieht durch bestimmte Arten von Bakterien, im wesentlichen durch Aerobien (sauerstoffveratmende niedere Lebewesen), denen das Phenol als Nahrung dient. Es besteht eine starke Abhängigkeit der Abbauleistung bzw. -geschwindigkeit von der Phenolkonzentration, der Wasser-

temperatur sowie dem Gehalt des Wassers an organischen Stoffen, Ammoniak und Phosphat. Im alkalischen Bereich vollzieht sich der Phenolabbau schneller als im sauren. Die optimale Wasserstoffionenkonzentration liegt bei pH-Werten von 7,0 bis 7,4.

Besonders wichtig für die Deutung unserer Versuchsergebnisse sind die bisher gewonnenen Erkenntnisse über den Verlauf des Phenolabbaues. Bei den experimentellen Untersuchungen über den Phenolabbau wurde insbesondere die Abbauleistung ermittelt. Je nach den verschiedenen Versuchsbedingungen (Phenolkonzentration, Gehalt an organischen Stoffen usw.) werden unterschiedliche Werte angegeben, allgemein jedoch recht hohe Abbauleistungen. Dabei ist darauf hinzuweisen, daß der Begriff "Phenole" ein Sammelbegriff ist. MEISSNER [15] hat festgestellt, daß die verschiedenen Phenole z.T. unterschiedlichen Abbauverlauf haben. Seine jeweils mit einer Anfangskonzentration von 500 mg/l durchgeführten Versuche hatten folgende Ergebnisse: Beimpft man ein phenolhaltiges Wasser mit Flußwasser, so tritt nach einer Inkubationszeit von mehreren Tagen ein plötzliches Verschwinden der Phenole ein, während die Keimzahl ganz erheblich ansteigt. Es hat also eine Aufzehrung durch bakterielle Tätigkeit stattgefunden. Dabei verlaufen die biologischen Oxydationen unterschiedlich. Karbolsäure und Kresole (einwertige Phenole) haben einen fast gleichen Abbauverlauf; nach einer Inkubationszeit von 2 bis 3 Tagen tritt ruckartig eine restlose Aufzehrung ein, selbst Spuren konnten nicht mehr nachgewiesen werden. Die Xylenole (ebenfalls einwertige Phenole) dagegen weichen erheblich davon ab; die Inkubationszeiten sind größer und betragen 4 bis 7 Tage, und es hat den Anschein, als ob der Abbau auf einer Zwischenstufe stehenbleibt. Von den mehrwertigen Phenolen werden nur Brenzkatechin, Resorcin und Phloroglucin abgebaut, während Hydrochinon und Pyrogallol einer aeroben biologischen Zersetzung standhalten. Der Abbau der ersteren verläuft nach kurzer Inkubationszeit in mäßig steiler Kurve, aber nicht vollständig.

Nach KALABINA und ROGOWSKAYA [10] beträgt bei stehendem Wasser die Höchstmenge des in 24 Stunden verbrauchten Phenols bei optimalen Bedingungen bis zu 100 mg/l. Von KALABINA [11] über 30 bis 40 Tage ausgedehnte Versuche mit stehendem Wasser, bei denen

laufend geringere Mengen oder einmalig dieselbe Gesamtmenge Phenol zugegeben wurde, zeigten, daß nach Versuchsende nur noch geringe Phenolreste vorhanden waren; aus dem Vergleich mit der zugegebenen Phenolmenge ergab sich, daß der Selbstreinigungsprozeß den Phenolgehalt um etwa 96 bis 98 % verminderte. Bei analogen Versuchen mit schwach fließendem Wasser wurde festgestellt, daß der Phenolzerfall mit vergleichsweise großer Schnelligkeit vor sich geht, die mit der Strömungsgeschwindigkeit wächst. Nach den Untersuchungen von KALABINA in Versuchsbehältern sowie in der Natur vollendet sich der Phenolzerfall bis zu den zehnten und hundertsten Teilen des mg/l, bei einem ursprünglichen Gehalt im Wasser bis zu 80 mg/l, im Sommer in den Fließstrecken, die das Wasser in 3 bis 4 Tagen durchströmt. Sowohl bei den Versuchen mit stehendem als auch fließendem Wasser wurde festgestellt, daß der Zerfall der Phenolreste außerordentlich langsam vor sich geht; Spuren von Phenol, welche durch hundertstel mg/l ausgedrückt sind, zerfallen sehr langsam und halten sich im Wasser viel länger als die großen Phenolmengen. Zu ähnlichen Ergebnissen kam BACH [1], [2], indem er bei Versuchen mit stehendem Wasser feststellte, daß bei Zusatz weiterer Phenolmengen zu schon phenoliert gewesenem Wasser - auch wenn die früheren Phenolzugaben schon abgebaut waren - der Phenolabbau immer langsamer stattfand. Er folgerte daraus, daß sich Stoffe zu bilden scheinen, die den biologischen Phenolabbau verzögern. Bei ergänzenden Versuchen mit teilweiser Erneuerung des Versuchswassers ermittelte er, daß Phenole im Betrag von 10 mg/l laufend abgebaut werden. Dabei fand in den ersten Versuchstagen der Abbau sehr rasch statt. Später stellte sich ein bis zu Ende des Versuchs anhaltendes ziemliches Gleichgewicht derart ein, daß der restlose Phenolabbau nach jeder Gabe nach 2, höchstens 4 Tagen vollzogen war. Während bei diesen Versuchen das Verschwinden des Phenols abgewartet wurde, bevor eine neue Zugabe erfolgte, wurde in einer weiteren Versuchsreihe dem Wasser täglich neues Phenol - auch über 10 mg/l hinaus - zugeführt. Auch bei dieser forcierten Phenolierung des Wassers wurde der Phenolgehalt jedesmal innerhalb von 24 Stunden auf ganz geringe Beträge bis Spuren abgebaut. BACH schreibt: "Bei dem ersten Versuch ohne Wasseraustausch ... zeigte es sich, daß demsel-

ben Wasser nur in immer längeren Zeitabständen Phenole zum Abbau zugeführt werden dürfen. Es entstanden offenbar Stoffe, die dem weiteren Abbau der Phenole hinderlich waren. Dies mögen Ausscheidungsprodukte der spezifischen Phenol abbauenden Kleinlebewesen des Wassers gewesen sein. Ich habe damals diese Erscheinung als "Ermüdung" des Wassers im Hinblick auf Phenolvernichtung angesprochen. Wenn nun ein Teil des Wassers laufend beseitigt und durch neues Wasser ersetzt wird - es genügte in unserem Falle die tägliche Beseitigung und Ersatz von nur 5 v.H. der Wassermenge -, so genügt das offenbar, um so viel der schädlichen Stoffe zu beseitigen oder sie zu verdünnen, um der Ermüdung des Wassers in bezug auf Phenolabbau zu steuern. In der Praxis käme dies etwa einem sehr langsam durchflossenen Wassersammelbecken gleich".

KALABINA und ROGOWSKAYA [10] haben bei ihren Versuchen auch die Entwicklung der Organismen im Wasser während des Prozesses des Phenolabbaues untersucht und kommen dabei zu ähnlichen Erklärungen. Nach dem Abbau der ersten Phenolportion beobachteten sie zunächst eine Beschleunigung des Prozesses, dann eine Verminderung: "Die Beschleunigung des Zerfallprozesses läßt sich damit erklären, daß die frische mineralische Phenollösung sehr wenig Bakterien enthält und die Bakterienentwicklung eine gewisse Zeit erfordert, die von der Phenolkonzentration abhängt. Mit der Bakterienentwicklung entsteht der Phenolzerfall. Fügt man nach Ablauf des Prozesses der Flüssigkeit eine neue Phenolportion zu, so liegt schon ein bakterienreiches Medium vor, weshalb die für den Zerfall der neuen Phenolportion nötige Zeit verkürzt wird. Die Ursache der nachfolgenden Zerfallverminderung ist noch nicht genau festgestellt. Wahrscheinlich sammeln sich in der Flüssigkeit die Produkte der Lebenstätigkeit der Organismen, welche den Prozeß verhindern. Die Zahlenwerte zeigen, daß mit der Steigerung der Phenolkonzentration die für seinen Zerfall nötige Zeit sich verlängert, doch ist die Zeitdauer der Konzentration nicht proportional, sondern geringer." Die Untersuchung der Bakterienentwicklung ergab folgendes Bild: "Anfangs hängt die Schnelligkeit der Bakterienentwicklung bei der ersten Phenolportion von der Phenolkonzentration ab. Nachher erreichte sie ein gewisses Maximum, solange das Phenol noch nicht ausgenutzt ist; dann wird

während des Phenolverwindens die Bakterienzahl geringer. Nach dem Hinzufügen einer neuen Phenolportion wiederholt sich anfangs die Bakterienvermehrung, und zwar rascher als bei der ersten Portion, dann folgt wieder ein Absinken der Bakterienzahl. Am Schluß des Versuches, wenn die Prozeßverhinderung eintritt, ist die Bakterienzahl bedeutend kleiner". Die Versuche von KALABINA und ROGOWSKAYA wurden allgemein bei Temperaturen zwischen 15 und 27°C durchgeführt. Zur Aufklärung des Einflusses niederer Temperaturen auf die Schnelligkeit des Prozesses wurden zwei spezielle Versuche angestellt. Die Ergebnisse zeigten, daß der Prozeß der Zersetzung der ersten Phenolportionen bei niederen Temperaturen doppelt verlangsamt wird beim Vergleich von 25° C mit 15° C und vierfach verlangsamt beim Vergleich von 17 bis 21° C mit 1,0 bis 2,6° C (wegen der Behinderung der Bakterienentwicklung). Bei der Zugabe neuer Phenolmengen in dieselbe Flüssigkeit wirkt der Temperaturunterschied auf den Zerfall gar nicht oder viel schwächer (nur zweifach statt vierfach).

4. Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse aus der Phenolbestimmung der Wasserproben wurden auf Abbildung 2 dargestellt; dabei wurde der Phenolgehalt als Funktion der Zeit graphisch aufgetragen.

Diese Darstellung zeigt bei der Probemasse I zu Beginn des Versuches ein sehr schnelles Ansteigen des Phenolgehaltes auf max. 4,6 mg/l ^{x)}, darauffolgend jedoch ein etwa ebenso schnelles Abfallen auf 3,6 mg/l. Von dort an (bei ca. 110 Versuchsstunden) war dann ein sehr langsames Sinken des Phenolgehaltes im Behälter festzustellen. Nach Beginn des Rührens wurde nochmals ein fast ebensolcher Anstieg und Abfall des Phenolgehaltes wie bei Versuchsbeginn festgestellt. Das Rühren erfolgte aus technischen Gründen (Arbeitsablauf) nicht kontinuierlich, sondern in Inter-

^{x)} Dieses Maximum ist leider nur durch einen einzelnen Meßwert belegt (sog. "unsicheres" Maximum $\angle 16.7$). Die bei den Versuchen allgemein relativ geringe Streuung der Meßwerte sowie der analoge Verlauf nach Beginn des Rührens lassen es jedoch als sicher erscheinen, daß die dargestellte Kurve den wirklichen Verhältnissen entspricht.

vallen; an den auf Abbildung 2 eingetragenen Meßpunkten ist jeweils die Summe der Stunden mit in Betrieb befindlichem Rührwerk bis zu der entsprechenden Probeentnahme angeschrieben.

Die Phenolabsonderungen der Probemasse II zeigten sich dagegen in ganz anderer Weise. Hier stieg der Phenolgehalt im Behälter verhältnismäßig langsam an. Er erreichte mit 0,85 mg/l etwa sein Maximum, blieb dann aber im ersten Teil des Versuches konstant bei dieser Menge. Nach etwa 360 Versuchsstunden begann ein leichtes Abnehmen der Konzentration. Nach Beginn des Rührens stieg auch wieder der Phenolgehalt im Behälter. Er erreichte mit 0,8 mg/l sein vorläufiges Maximum und blieb bis zur 700. Versuchsstunde konstant, stieg danach jedoch weiter an, so daß am Ende des Versuches (bei 1038 Versuchsstunden) 1,9 mg/l im Behälter vorhanden waren.

Die graphische Darstellung zeigt, daß die Phenolabsonderung aus der Probemasse III relativ gering ist. Der Phenolgehalt im Behälter stieg sehr langsam an und erreichte schon bei ca. 180 Versuchsstunden ein Maximum von rd. 0,25 mg/l. Danach zeigte sich wieder ein Absinken der Konzentration. Es wurde deshalb schon nach etwa 310 Stunden mit dem Rühren begonnen. Dadurch stieg der Phenolgehalt nochmals etwas an und erreichte bei 500 Versuchsstunden sein Maximum von 0,30 mg/l, um danach wieder abzusinken.

Bei der Untersuchung der Probemasse I wurden nach Ablauf des auf Abbildung 2 dargestellten Versuchs das phenolhaltige Wasser aus dem Behälter entfernt und - um festzustellen, ob aus dem bituminösen Belag das Phenol nun völlig ausgelaugt oder ob dies ein fortwährender Vorgang sei - frisches Wasser eingefüllt und nochmals in der beschriebenen Art Wasserproben entnommen. Während am Ende des Versuchs nach Abbildung 2 eine Phenolkonzentration bei durchgerührtem Wasser von 2 mg/l vorhanden war, trat in dem frischen stehenden Wasser nur noch eine schwache Konzentration auf, welche innerhalb kurzer Zeit auf rd. 0,3 mg/l anstieg und anschließend angenähert konstant blieb. Nach rd. 720 Versuchsstunden wurde wiederum mit Rühren begonnen; dadurch erhöhte sich die Konzentration auf rd. 0,4 mg/l und blieb dann ebenfalls konstant. Daraufhin wurde der Versuch nach 1180 Stunden, wovon

70 Stunden das Rührwerk lief, abgebrochen. Dieses Ergebnis mit dem nachgefüllten Frischwasser läßt den Schluß zu, daß aus der bituminösen Masse nur in der ersten Zeit, nachdem sie dem Wasser ausgesetzt wird, Phenol abgesondert wird, oder mit anderen Worten: einmal "ausgelaugt", werden keine nennenswerten Phenolmengen mehr abgesondert.

5. Diskussion der Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung des Phenolabbaues

Mit den in Abschnitt 3. zusammengestellten Erkenntnissen über den Phenolabbau im Wasser ist eine teilweise Deutung der auf Abbildung 2 dargestellten Versuchsergebnisse möglich. Grundsätzlich ist festzustellen, daß unter Berücksichtigung des Phenolabbaues die Absolutwerte der tatsächlich abgesonderten Phenolmengen wahrscheinlich wesentlich höher liegen, als die im Versuchswasser ermittelten Phenolgehalte; eine Einschränkung dieser Annahme ist wohl allerdings für den Versuchsbeginn zu machen.

Eine Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Phenolkonzentration im Versuchsbehälter läßt bei der Probemasse I folgende Deutung zu: Das sich aus der bituminösen Masse lösende Phenol brachte einen schnellen Anstieg der Konzentration. Die Bakterienentwicklung erforderte eine gewisse Zeit, abhängig von der Phenolkonzentration. Mit der Bakterienentwicklung entstand der Phenolabbau. Nach einem sehr steilen Abfall der Konzentration zwischen der 69. und 113. Versuchsstunde (Zeitraum von 44 Stunden = rd. 2 Tagen) blieb sie bis etwa zur 300. Versuchsstunde annähernd konstant, um dann langsam weiter abzufallen. Über den zeitlichen Ablauf der Phenolabsonderung selbst aus der bituminösen Masse läßt sich nichts aussagen, da dieser Vorgang durch den Phenolabbau im Wasser überdeckt wird. Der beschleunigte Abbauprozess läßt sich durch die einsetzende Bakterienentwicklung erklären. Nach den Versuchen von KALABINA und ROGOWSKAYA verlängert sich die für den Abbau nötige Zeit mit der Steigerung der Phenolkonzentration. Es ist möglich, daß durch fortschreitende Absonderung von Phenol aus der bituminösen Masse dem Versuchswasser größere Phenolmengen zugeführt wurden, woraus sich in Zusammenwirken mit den Abbauvorgängen die dargestellte Kurve des lang-

samen Abfalls der Phenolkonzentration als resultierendes Ergebnis zeigt. Als weiterer Grund wird auf die Hypothese der "Ermüdung" des Wassers hinsichtlich des Phenolabbaues verwiesen. Die nach rd. 460 Stunden aus verschiedenen Abschnitten des Versuchsbehälters entnommenen Wasserproben zeigten, daß die Konzentration an allen Stellen gleich war, sich also ohne Umrühren o.ä. in der gesamten Wassermasse (rd. $2,6 \text{ m}^3$) gleichmäßig verteilt hatte. Die nach Einsetzen des Rührens in verschiedenen Bereichen des Behälters entnommenen Wasserproben zeigten ebenfalls eine gleichmäßig verteilte Phenolkonzentration. Bereits unmittelbar nach Inbetriebnahme des Rührwerkes ist ein Anstieg derselben feststellbar, d.h. durch die Wasserbewegung wurde verstärkt Phenol aus der bituminösen Masse gelöst. Der anschließende Kurvenverlauf ähnelt dem zu Versuchsbeginn. Nach dem steilen Erreichen eines Maximums, welches etwas unter dem anfangs erreichten Wert bleibt, jedoch in der gleichen Größenordnung liegt, folgt ein Abfall der Phenolkonzentration. Unmittelbar nach Beginn des Rührens wurden in kürzeren Zeitabständen Wasserproben entnommen; nach der Entnahme einer Probe nach einer Rührdauer von 19 Stunden wurde zwecks Einschränkung des Untersuchungsaufwandes vorerst mit der Entnahme weiterer Proben ausgesetzt. Nach weiterem, in Intervallen durchgeführten Rühren wurden erst wieder nach rd. 1000 Versuchsstunden Wasserproben entnommen, welche eine wesentlich verringerte Phenolkonzentration ergaben. Der Kurvenverlauf nach dem Maximum zeigt, daß es richtiger gewesen wäre, etwa im Bereich der 600. Versuchsstunde weiterhin Wasserproben zu entnehmen, um den Verlauf genauer festzulegen. Da die Wasserproben jedoch zur Phenolbestimmung erst an das chemische Labor eingesandt werden mußten und bis zum Bekanntwerden des Ergebnisses ein gewisser Zeitraum verging, ließen sich daraus leider keine operativen Entschlüsse für den Versuchsablauf fassen. Es wird jedoch angenommen, daß der tatsächliche Kurvenverlauf etwa dem lang gestrichelt, also mit steilem Abfall eingezeichneten entspricht. Die Erklärung dieses Kurvenverlaufs entspricht dem zu Versuchsbeginn. Mit Anstieg der Phenolkonzentration bildeten sich wieder vermehrt Bakterien; danach fand ein beschleunigter Phenolabbau statt, welcher in eine langsamere

Abnahme der Phenolkonzentration übergang.

Sowohl beim stehenden Versuchswasser als auch nach Inbetriebnahme des Rührwerks wurde bei beiden untersuchten Probemassen im Bereich des Versuchsbehälters ein starker Phenolgeruch wahrgenommen. Nach Beginn des Rührens wurde ein starkes Schäumen des Wassers beobachtet. MEISSNER schreibt u.a.: "Bei Eintritt des aeroben Abbaues kann schon als äußeres Kennzeichen einer Veränderung ein starkes Schäumen beobachtet werden, verursacht durch neugebildete organische Körper (Schleimstoffe) [15]". Die auf Abbildung 2 aufgetragenen Versuchsergebnisse zeigen, daß jedoch bereits im stehenden Wasser ein Abbau erfolgte, ohne daß stärkeres Schäumen auftritt. Durch das Rühren erfolgte auch eine stärkere Belüftung des Wassers. Da die Mehrzahl der phenolspaltenden Bakterien Aerobier sind und die Abbauvorgänge oxydativ verlaufen, kann dadurch aber ein rascherer Phenolabbau eingetreten sein. Die Wirkung der Belüftung auf den Phenolabbau ist jedoch abhängig vom Gehalt des Wassers an organischen Stoffen. Sind diese nicht vorhanden, so hat nach BEER [4] die Belüftung keinen Einfluß. In dem verwendeten Versuchswasser ist der Anteil organischer Stoffe nicht allzu hoch gewesen. Nach dem Rühren wurde beobachtet, daß sich an der der eingebauten Böschung gegenüberliegenden Seite des Versuchsbehälters, an welcher sich die Strömung umkehrte und ein gewisser Stau auftrat, in Höhe des Wasserspiegels (in einem schmalen Streifen) an der Behälterwandung ein schwärzlicher Belag ansetzte. Es wird vermutet, daß es sich um den Niederschlag von aus dem Böschungsbelag abgesonderten bituminösen Stoffen handelte. x) Bei der Untersuchung sowohl der Probemasse I als auch II wurde der sich an dieser Stelle des Behälters an der Wasseroberfläche befindliche Schaum auf Phenolgehalt untersucht; es ergaben sich Werte, die bei Probemasse I mit 15 mg/l etwa um das 3,7-fache und bei Probemasse II mit 4,8 mg/l um das 2,5-fache über der im Entnahmezeitpunkt im übrigen Versuchswasser vorhandenen Konzentration lagen.

x) MEISSNER [15] weist darauf hin, daß Polyphenole auf rein chemischem Oxydationswege braune bis schwarze Farbstoffe (huminähnliche Körper) bilden, welche ebenfalls ein Schäumen des Wassers begünstigen.

Wie bereits erwähnt, ist der Kurvenverlauf bei der Untersuchung der Probemasse II gegenüber der Masse I gänzlich anders. Wie ist dieser Unterschied zu erklären? Einmal wurde eine andere Bitumenemulsion verwendet. Abgesehen von sich daraus evtl. ergebenden quantitativen Unterschieden hat die Kurve für die Probemasse II aber auch einen völlig anders gearteten qualitativen Verlauf. Die Deutung der Kurve für die Probemasse I (beschleunigter Phenolabbau nach Erreichen einer bestimmten Phenolkonzentration, anschließend langsamer Abfall) steht in Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen von BACH, MEISSNER, KALABINA und ROGOWSKAYA. Die Kurve für die Probemasse II weicht in ihrem Verlauf wesentlich von den von diesen Autoren angegebenen Kurven der Abbauleistung ab. Es soll jedoch versucht werden, den Kurvenverlauf an Hand der von den verschiedenen Autoren gewonnenen allgemeinen Erkenntnisse zu deuten. Abgesehen von der Verwendung verschiedener Bitumenemulsionen bestand der wesentliche Unterschied der Versuchsbedingungen darin, daß die Untersuchung der Probemasse I bei einer Wassertemperatur von rd. 10°C , derjenigen der Probemasse II bei einer von rd. 21°C stattfand. (Die Wassertemperaturen wurden während des gesamten Versuchs laufend gemessen; sie schwankten nur wenig um die genannten Durchschnittswerte.) Durch die höhere Wassertemperatur herrschten für die Bakterien günstigere Lebensbedingungen. KALABINA und ROGOWSKAYA [10] stellen fest, daß der Prozeß des Abbaues einer ersten Phenolportion um das doppelte schneller vor sich geht, wenn die Temperatur um 10°C von 15 auf 25°C steigt. Bei unseren Versuchen lag dieselbe Temperaturdifferenz vor; ebenfalls befanden wir uns etwa im gleichen Temperaturintervall. Es kann also angenommen werden, daß von Beginn des Versuchs mit der Probemasse II an eine größere Abbauleistung erfolgte. Es ist möglich, daß dadurch der im Verlauf der Kurve I typische steile Anstieg und nach Erreichen eines Maximums ebenso steile Abfall überdeckt werden. Nach einem langsamen Anstieg der Konzentration blieb dieselbe bei der Probemasse II bis zum Beginn des Rührens nahezu konstant. Der Meßwert kurz vor Rührbeginn zeigt eine etwas geringere Konzentration, die nach dem Rühren - wodurch wahrscheinlich wieder neues Phenol aus der bituminösen Masse gelöst wurde - wieder etwas

ansteigt, und zwar auf denselben mittleren Betrag, der vorher herrschte. Auffallend ist, daß nach rd. 700 Versuchsstunden ein Anstieg der Phenolkonzentration im Behälter stattfand, ganz im Gegensatz zum Verlauf der Kurve bei der Untersuchung der Probemasse I. Mit dem Ansteigen der Phenolkonzentration begann sich auch das Wasser im Behälter bräunlich zu färben. Nun stellten KALABINA und ROGOWSKAYA fest, daß bei der Zugabe neuer Phenolmengen in dieselbe Flüssigkeit sich der Temperaturunterschied schwächer auf die Abbauleistung auswirkt als bei der ersten Phenolportion. In Verbindung mit der sog. "Ermüdung" des Wassers kann dies zu einem Nachlassen der Abbauleistung nach der 700. Versuchsstunde geführt haben. Der nachfolgende Anstieg der Phenolkonzentration zeigt, daß in diesem Zeitraum immer noch eine Absonderung von Phenol aus der bituminösen Masse stattfand. Leider konnte bei dieser Probemasse aus zeitlichen Gründen kein neuer Versuch mit Frischwasser - wie bei Probemasse I - angestellt werden, so daß nicht mehr festgestellt werden konnte, wie weit diese Absonderung noch reicht. Nach Versuchsende hatte die Konzentration im Versuchsbehälter etwa den gleichen Wert erreicht wie bei der Probemasse I.

Im Zusammenhang mit der Untersuchung der Probemasse II erfolgte eine genauere Analyse des beim Versuch verwendeten natürlichen Kanalwassers in seinem Ausgangszustand (Wasserprobe I) und einer Probe aus dem Versuchsbehälter (Wasserprobe II). Die Analysenergebnisse sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt. Die durchgeführte Analyse des Versuchswassers charakterisiert nicht nur dasselbe, sondern bestätigt auch noch einzelne Punkte der dargelegten Deutung der Versuchsergebnisse. So geht aus den Analysen hervor, daß das Versuchswasser mit einem pH-Wert von rd. 7,4 noch gerade im Bereich der für den Phenolabbau optimalen Wasserstoffionenkonzentration liegt. Die Inhaltsstoffe beider Wasserproben unterscheiden sich nur unwesentlich. Von besonderem Interesse für die Beurteilung sind der Abdampfdruckstand, der Glühverlust und der Kaliumpermanganatverbrauch.

Eines der wichtigsten Kriterien für die Beurteilung der Belastung eines Gewässers ist sein Sauerstoffhaushalt. Die im Wasser

vorhandenen Stoffe können den im Wasser gelösten Sauerstoff verbrauchen

- a) durch rein chemische Reaktionen,
- b) durch biochemische Abbauvorgänge mit Hilfe von Mikroorganismen.

Für unsere Versuche gilt vor allem das letzte. Der Sauerstoffverbrauch wird untersucht durch Feststellung

- a) des Kaliumpermanganatverbrauchs,
- b) des Abdampfrückstandes,
- c) des Glühverlustes,
- d) der Sauerstoffzehrung,
- e) des biochemischen Sauerstoffbedarfs (BSB₅).

Es wurde von uns nur eine physikalisch-chemische Untersuchung des Wassers durchgeführt, so daß Bestimmungen zu d) und e) nicht erfolgen konnten. Eine unmittelbare Feststellung der im Wasser gelösten organischen Stoffe ist nicht möglich. Der Gehalt des Wassers an organischen Substanzen - meist Zertrümmerungsprodukte tierischer oder pflanzlicher Teile - ist chemisch durch die Größe des Kaliumpermanganat (KMnO_4) - Verbrauchs annähernd bestimmbar. Dabei erfolgte eine Zerstörung der organischen Stoffe durch Oxydation, so daß man auch vom Sauerstoffverbrauch spricht. Eine weitere chemisch-physikalische Bestimmung der organischen Bestandteile ist aus dem Abdampfrückstand des Wassers möglich. Darunter versteht man das Gewicht der nach Verdampfen des Wassers bei 105° C nicht flüchtigen Bestandteile. Wird der Rückstand bei 600 bis 700° C verglüht (verbrannt = oxydiert), vermindert sich sein Gewicht um den sog. Glühverlust. Dieser ist mit der Menge der vorhandenen oxydierten (organischen) Substanz vergleichbar, darf dieser aber nicht ohne weiteres gleichgesetzt werden, da beim Glühen nicht nur organische Stoffe verbraucht werden, sondern auch bei anorganischen Substanzen durch den dabei entstehenden Wasserentzug ein erheblicher Gewichtsverlust eintreten kann.

In der nachstehenden Tabelle 3 werden die betreffenden Werte der beiden untersuchten Wasserproben gegenübergestellt.

		Ausgangs- wasser (Probe I)	phenolisiertes Wasser (Probe II)	Verhältnis- werte (Sp.4 : Sp.3)
1	2	3	4	5
Abdampfrückstand	mg/l	445	546	1,23
Glühverlust	mg/l	203	234	1,15
Kaliumpermanganat- verbrauch	ml	8,5	35	4,12

Tabelle 3
Untersuchungen zum Sauerstoffverbrauch

Die Gegenüberstellung verdeutlicht die starke Zunahme der organischen Stoffe im Versuchswasser. Die Wasserprobe II wurde nach 677,5 Versuchsstunden entnommen - wie Abbildung 2 zeigt, also im Bereich des Nachlassens der Phenolabbauleistung. Die Untersuchungen von KALABINA und ROGOWSKAYA ergaben, daß "am Schlusse des Versuches, wenn die Prozeßverhinderung eintritt, die Bakterienzahl bedeutend kleiner ist" als in den vorhergehenden Versuchsabschnitten. Die Anreicherung des Versuchswassers mit organischen Stoffen deutet also darauf hin, daß es sich dabei um "Ausscheidungsprodukte der spezifischen Phenol abbauenden Kleinlebewesen des Wassers ..., die dem weiteren Abbau der Phenole hinderlich" sind (BACH [2]) oder mit den Worten von KALABINA und ROGOWSKAYA um die "sich in der Flüssigkeit sammelnden Produkte der Lebenstätigkeit der Organismen, welche den Prozeß (des Phenolzerfalls) verhindern", handelt.

Der für die Probemasse III ermittelte Kurvenverlauf mit nur sehr geringen Unterschieden in der Phenolkonzentration bietet keine Ansatzpunkte zu einer Interpretation des Verlaufs des Phenolabbaues.

6. Abschätzung der praktischen Auswirkungen

In seiner Veröffentlichung über labormäßige Untersuchungen des Phenolabbaues schrieb BACH im Jahre 1928 [1]: "Wie weit der Abbau der Phenole in Flußläufen aber tatsächlich stattfindet,

wieviel der Wasserführung eines Flußlaufes noch phenolischer Flüssigkeiten zugemutet werden darf, damit nach einer gewissen Zeit bzw. nach einer gewissen Strecke des Flußverlaufs die Phenole zuverlässig abgebaut sind, oder wie sich dieser Abbau in stehenden Gewässern vollzieht, darüber fehlt noch so gut wie jede exakte Beobachtung, man ist nur mehr oder weniger auf Vermutungen oder Schätzungen angewiesen". Er glaubte, mit seinen labormäßigen Untersuchungen "einen ersten tastenden Versuch gemacht zu haben, um die Klärung dieser Frage auf Grund analytischer Prüfungen in die Wege zu leiten". Auf Grund seiner Versuche mit teilweiser Wassererneuerung macht er folgende Rechnung auf [1]:

"Während der 3-monatlichen Versuchszeit sind in Berücksichtigung des täglichen teilweisen Wasseraustausches zusammen 960 l Wasser mit 58,8 g Phenol versetzt worden, das restlos abgebaut wurde. Das ergibt pro l Wasser und Tag gerechnet einen Abbau von rd. 0,7 mg Phenol. Das ist eine außerordentlich hohe Abbauleistung, aus der man nicht ohne weiteres Schlüsse auf mögliche Phenolbelastung öffentlicher Gewässer ziehen darf, denn das würde bedeuten, daß man z.B. einen Fluß mit 100 m^3 sekundlicher Wasserführung, sofern er sich um günstigen biologischen Zustand befindet, täglich 6 t Phenol mit Aussicht auf restlosen Abbau zuführen könnte. Das erscheint höchst unwahrscheinlich". Die von KALABINA und ROGOWSKAYA angegebenen Werte liegen sogar noch höher. Eine analoge Berechnung für unsere Versuche ist nicht möglich, da über die abgesonderte Phenolmenge selbst nichts bekannt ist. Eine unmittelbare Umrechnung der aus Laborversuchen gewonnenen Werte auf Naturverhältnisse scheint also nicht ohne weiteres möglich zu sein.

Seit der eingangs dieses Abschnitts zitierten Veröffentlichung von BACH liegen doch schon etliche Beobachtungen über den Phenolabbau in natürlichen Gewässern vor, u.a. [11], [12], [18]. VOIGT und RÄNKER [18] z.B. geben Kurven der Phenolkonzentration im Vorfluter in Abhängigkeit von der Entfernung vom Auslauf der Kläranlage des Teerwerkes Erkner an. Danach betrug im Januar 1962 die Konzentration an der Einleitungsstelle 1,8 mg/l, welche nach 3 km bis auf etwa 0,12 mg/l abgebaut war.

Im Januar 1963 betrug durch Umgestaltung der Abwasserreinigungsanlage des Werkes die Konzentration an der Einleitungsstelle nur noch 0,5 mg/l; nach 3 km war sie bis auf etwa 0,04 mg/l abgebaut. Der restliche Abbau erfolgte langsamer; sowohl im Januar 1962 als auch 1963 waren nach insgesamt 9 km noch Spuren (weniger als 0,01 mg/l) vorhanden. Die Phenolbelastung des Vorfluters durch das Teerwerk lag früher im Mittel bei rd. 3 bis 4 t monatlich; nach Inbetriebnahme der neuen biologischen Reinigungsanlage konnte die Belastung auf etwa 1/10 der ursprünglichen Größe reduziert werden.

Es ist zu unterscheiden zwischen der in einem Gewässer absolut möglichen Abbauleistung und der mit Rücksicht auf die Lebensvorgänge u.ä. (Wasserversorgung, Fischerei usw.) zulässigen Konzentration. Im Falle des Teerwerkes Erkner wurde von den Dienststellen der Wasserwirtschaft z.B. gefordert, daß der Phenolgehalt im Müggelseewasser am Wasserwerk Friedrichshagen nicht mehr als 0,01 mg/l betragen darf; am Ausgang des Flakenfließens (Straßenbrücke Erkner) soll er nicht über 0,03 mg/l liegen. Die Einhaltung dieser Werte ist dann möglich, wenn der Abwasserauslauf des Teerwerkes durchschnittlich nicht mehr als 5 mg/l wasserdampfflüchtige Phenole enthält. Spezielle Untersuchungen wurden darüber angestellt, in welcher Konzentration Phenol auf Fische giftig wirken. IMHOFF [9] gibt an, daß für Fische allgemein ein Phenolgehalt von 5 mg/l tödlich wirkt. BANDT [3] gibt in einer zusammenfassenden Veröffentlichung höhere Werte an: Reines Phenol (Karbolsäure) wirkt nach den neuesten Untersuchungen von WUHRMANN und WOKER giftig auf

Bachforellen	ab 9,5 mg/l
Döbel	ab 10 mg/l
Barsch	ab etwa 12 mg/l
Elritzen	ab etwa 17 mg/l;

nach EBELING wirken Phenol und Kresol ab 10 bis 15 mg/l auf Aale, Schleie und Karpfen tödlich. Aber auch ein relativ geringer Gehalt schadet im Fischgewässer bereits dadurch, daß das Fischfleisch einen üblen Geschmack annimmt; nach EBELING [9] tritt dieser Schaden nicht ein, wenn der Phenolgehalt des Wassers geringer ist

als 0,02 mg/l.

Ebensowenig wie die unmittelbare Übertragung der labormäßig ermittelten Abbauleistungen ist auch ein direkter Vergleich der bei unseren Versuchen festgestellten Phenolkonzentrationen mit den vorstehend genannten "Grenzwerten" möglich. Die Konzentration ist u.a. abhängig vom Verhältnis der Bitumen- zur Wassermenge. Für die Versuche ließe es sich berechnen. Vergleicht man dieses im Versuchsbehälter vorhandene Verhältnis mit den Abmessungen natürlicher Gewässer, so kommt man zu der Feststellung, daß unter natürlichen Verhältnissen die Konzentrationen um ein Mehrfaches geringer sind als bei der verwendeten Versuchsanordnung. Hinzu kommt, daß bereits bei schwacher Strömung die Abbauleistung erheblich wächst. Unbekannt ist allerdings, welcher Teil einer Wassermenge oder eines Abflusses z.B. in einem mit bituminösen Uferbefestigungen versehenen Kanal an der "Auslaugung" derselben sowie an der Vermischung beteiligt ist. Bei der Einleitung von Abwässern z.B. handelt es sich um eine Phenolzugabe an einem lokalisierten Punkt; auf der anschließenden Flußstrecke wird das Phenol nach und nach abgebaut. Bei längeren Strecken mit bituminöser Uferbefestigung kommen dagegen laufend neue Phenolmengen hinzu. Greift man jedoch auf das Versuchsergebnis zurück, daß aus dem einmal "ausgelaugten" Belag im Frischwasser nur noch $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{7}$ der vorhergegangenen Konzentration ermittelt wurden, so dürften zumindest im Falle eines Fließgewässers mit schwacher Strömung kaum Bedenken gegen die praktische Anwendung der untersuchten bituminösen Massen für Uferbefestigungszwecke bestehen.

Ein beachtliches praktisches Ergebnis erhält man aus den Versuchen durch einen Vergleich der für die verschiedenen untersuchten Probemassen ermittelten Phenolkonzentrationen. Selbst wenn man den abweichenden Einfluß der Wassertemperatur bei der Probemasse II berücksichtigt, so ist doch der wesentlich geringere Phenolgehalt der Probemasse III offensichtlich. Daraus geht hervor, daß es durchaus möglich ist, kaltverarbeitbare Bitumenemulsionen für die Verwendung im Asphaltwasserbau herzustellen, welche vergleichsweise wenig Phenol absondern. Man kann daher die Verwendung von Verschnittbitumen bzw. Emulsionen aus Gründen des Ge-

wässerschutz nicht von vornherein ablehnen. Die experimentelle Untersuchung der Phenolabsonderung im Versuchsbehälter bietet die Möglichkeit, zumindest durch vergleichende Betrachtungen den evtl. Schädlichkeitsgrad einer bestimmten Bitumensorte abzuschätzen. Man könnte sogar als Kriterium für die Verwendbarkeit eine bestimmte Phenolkonzentration im Versuchsbehälter festsetzen, welche unter genau festgelegten Versuchsbedingungen nicht überschritten werden darf.

7. Zusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen über die Absonderung von Phenol aus kaltverarbeitbaren bituminösen Massen ergaben, abhängig von der jeweils verwendeten Bitumenemulsion, große Unterschiede der Phenolkonzentration im Versuchsbehälter. Die Ergebnisse zeigen, daß es durchaus möglich ist, kaltverarbeitbare Bitumenemulsionen für die Verwendung im Asphaltwasserbau herzustellen, welche vergleichsweise wenig Phenol absondern und deren Einsatz daher bezüglich der Auswirkungen auf die Wasserqualität unbedenklich erscheint.

Trotz des sehr umfangreichen Schrifttums über Asphaltbauweisen im Wasserbau sind bisher kaum Untersuchungen über die Auswirkung der bituminösen Baustoffe auf die Wasserqualität bekannt geworden. Mit den von uns durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben wir einen tastenden Versuch gemacht, einige quantitative Erkenntnisse zu gewinnen. Um auf diesem Gebiet weitere Unterlagen und damit bessere Möglichkeiten der Beurteilung zu erhalten, wäre es zu begrüßen, wenn auch entsprechende Untersuchungen in der Natur durchgeführt und deren Ergebnisse mitgeteilt würden.

Abschließend danken die Verfasser dem Wasserstraßenhauptamt Berlin sowie dem Wasserstraßenamt Eberswalde, durch deren Auftragserteilung die Durchführung der Untersuchungen ermöglicht wurde.

Literaturverzeichnis

- [1] BACH: Zur Frage des biochemischen Abbaues von Phenolen in natürlichen Wässern. "Gesundheitsingenieur", Jg. 1928, Heft 48, S. 773.
- [2] BACH: Phenolschwund im Wasser. "Gesundheitsingenieur", Jg. 1929, Heft 46, S. 796.
- [3] BANDT: Phenolabwässer und Abwasserphenole, ihre Entstehung, Schadwirkung und abwassertechnische Behandlung - eine monographische Studie. "Wissenschaftliche Abhandlungen der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin", Nr. 33; Akademie-Verlag, Berlin 1958.
- [4] BEER: Über den Einfluß des Phenolgehaltes des Pleißewassers auf die Mikrolebewelt. "Wasserwirtschaft-Wassertechnik", Jg. 1954, Heft, 4, S. 125.
- [5] BLAU: Neuzeitliche Meßverfahren zur laufenden Überwachung der Flußsole. "Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Schriftenreihe Wasser- und Grundbau", Heft 1, Berlin 1961, S. 34.
- [6] DEMPWOLFF: Bitumen und Asphalt im Wasserbau. In: Bitumen- und Asphalt-Taschenbuch; 3. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden/Berlin 1964.
- [7] Forschungsinstitut für Wasserbau und Wasserkraft e.V., München (mehrere Verfasser): Versuche über die Brauchbarkeit von Asphalt und Teer zur Dichtung und Befestigung von Erdbauten. Mitteilungen, Heft 2, (Sonderheft); Verlag von R. Oldenburg, München und Berlin 1932.
- [8] HAAS: Technische Eigenschaften von Asphaltbeton für Wasserbauzwecke. "Die Bautechnik", Jg. 1959, Heft 9, S. 339.
- [9] IMHOFF: Taschenbuch der Stadtentwässerung. VEB Verlag Technik, Berlin 1953.

- [10] KALABINA und ROGOWSKAYA: Die Bedingungen des Prozesses der Phenol-zersetzung.
"Zeitschrift für Fischerei", Bd. 32 (1934), S. 153.
- [11] KALABINA: Der Phenolzerfall in Fließ- und Stauge-wässern.
"Zeitschrift für Fischerei", Bd. 33 (1935), S. 295.
- [12] MACKIEWICZ-GOLACHOWSKA: Einige Ursachen des Phenolschwundes im Flußwasser.
"Intern. Revue der gesamten Hydrobiolo-gie", Bd. 48 (1963), Heft 4, S. 613.
- [13] MAROTZ: Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwas-serbau.
"Mitteilungen des Instituts für Wasser-wirtschaft, Grundbau und Wasserbau der Technischen Hochschule Stuttgart", Heft 2, 1964.
- [14] MÖSSLANG: Der Baustoff Asphalt im Wasserbau.
"Die Wasserwirtschaft", Jg. 1966, Heft 1, S. 2.
- [15] MEISSNER: Über den biologischen Abbau der Phenole.
"Wasserwirtschaft-Wassertechnik", Jg. 1953, Heft 12, S. 470.
- [16] PIRANI und FISCHER: Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik.
Sammlung Götschen, Bd. 728/728a; Verlag Walter de Gruyter u. Co., Berlin 1957.
- [17] RÖHNISCH u.a.: Schrifttum Asphalt im Wasserbau.
(Schrifttumverzeichnis, umfassend 832 Ti-tel aus den Jahren 1930 bis 1959), Deut-sche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Arbeitskreis 8b "Asphaltbauweisen", Stuttgart 1960.
- [18] VOIGT und RÄNKER: Die biologische Abwasserreinigungsanlage des VEB Teerdestillation und Chemische Fabrik Erkner.
"Wasserwirtschaft-Wassertechnik", Jg. 1964, Heft 6, S. 177.
- [19] ZITSCHER: Möglichkeiten und Grenzen in der konstruk-tiven Anwendung von Asphaltbauweisen bei Küstenschutzwerken.
"Mitteilungen der Hannoverschen Versuchs-anstalt für Grundbau und Wasserbau. Franzius-Institut der Technischen Hoch-schule Hannover", Heft 12, Hannover 1957.

T a b e l l e 1

Analysenergebnis von Wasserprobe I
(Versuchswasser im Ausgangszustand)

pH

7,35

Azidität:

Methylorange-Azid.: 0 ml n/1 NaOH je Liter
Phenolphthalein-Azid.: 0,30 ml n/1 NaOH je Liter

Alkalität:

Methylorange-Alkal.: 2,5 ml n/1 HCl je Liter
Phenolphthalein-Alkal.: 0 ml n/1 HCl je Liter

Abdampfückstand:

445 mg/l

Glühverlust:

203 mg/l

Kalzium:

114 mg/l CaO

Magnesium:

17 mg/l MgO

Eisen:

0 mg/l FeO

Sulfat:

111 mg/l SO_4

Kaliumpermanganatverbrauch:

(n/100 Lösung für 100 ml Wasser) 8,5 ml

Phenol:

0 mg/l

T a b e l l e 2

Analysenergebnis von Wasserprobe II
(phenoliertes Wasser aus dem Versuchsbehälter)

pH

Azidität:

Methylorange-Az.:	0	ml	n/1 NaOH	je Liter
Phenolphthalein-Az.:	0,35	ml	n/1 NaOH	je Liter

Alkalität:

Methylorange-Alk.:	3,0	ml	n/1 HCl	je Liter
Phenolphthalein-Alk.:	0	ml	n/1 HCl	je Liter

Abdampfrückstand: 546 mg/l

Glühverlust: 234 mg/l

Kalzium: 105 mg/l CaO

Magnesium: 37 mg/l MgO

Eisen:

Gesamteisengehalt	0,7 mg/l FeO
Eisen-III-Verbindungen	0,6 mg/l FeO

Sulfat: 120 mg/l SO₄

Kaliumpermanganatverbrauch:

(n/100 Lösung für 100 ml Wasser) 35 ml

Phenol: 0,8 mg/l

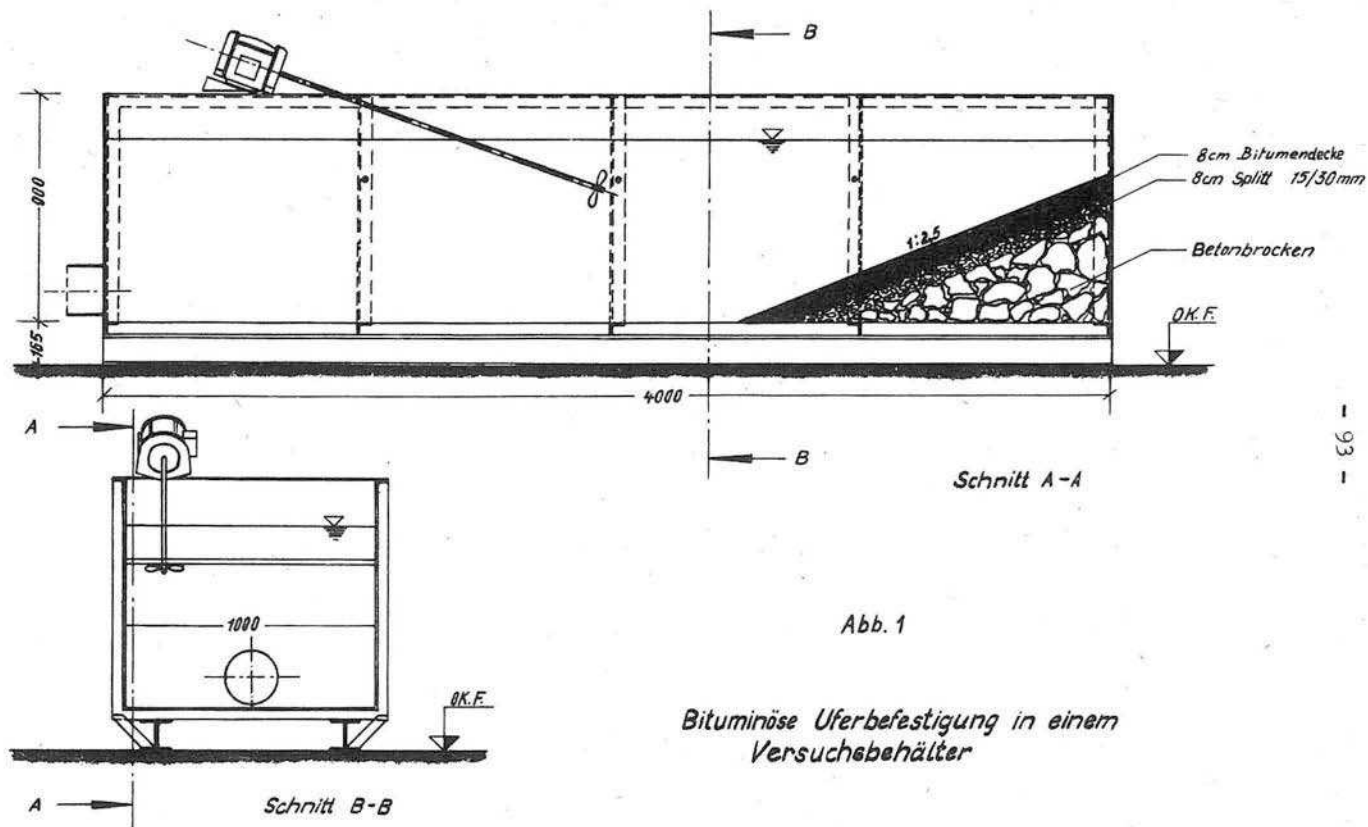
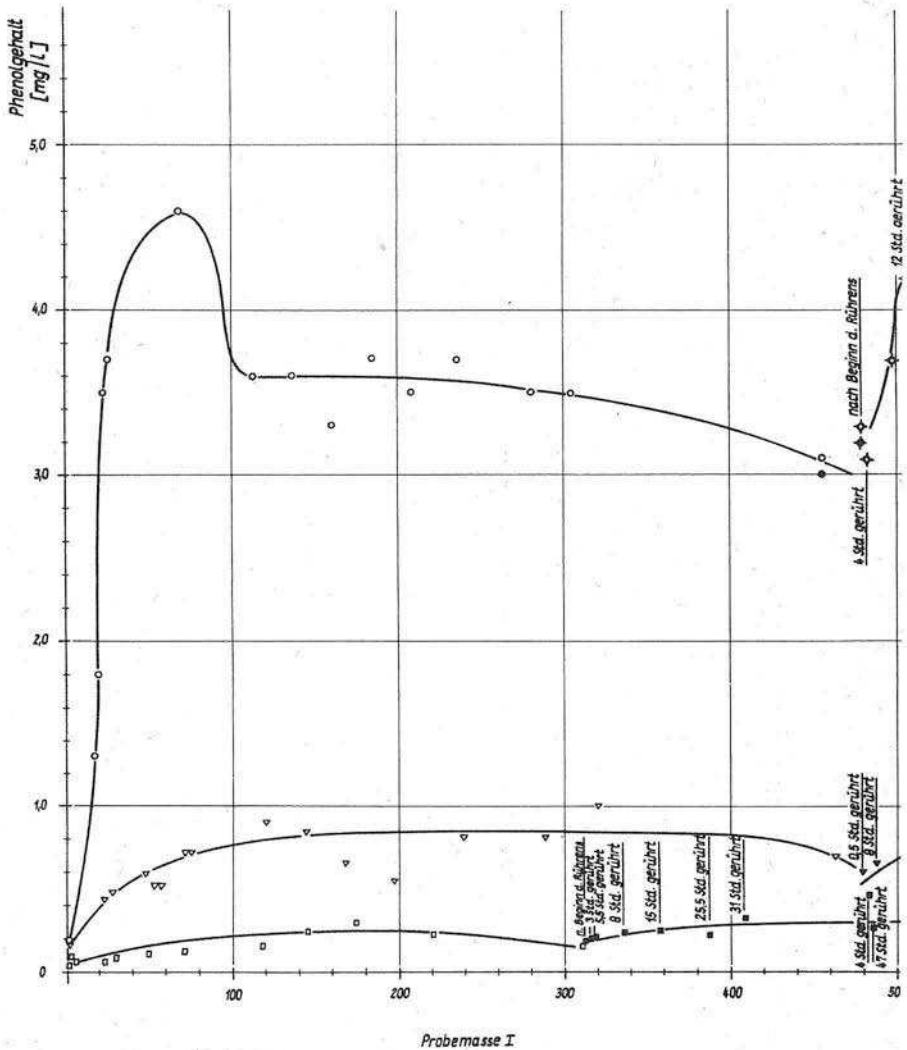


Abb. 1

Bituminöse Uferbefestigung in einem
Versuchsbehälter

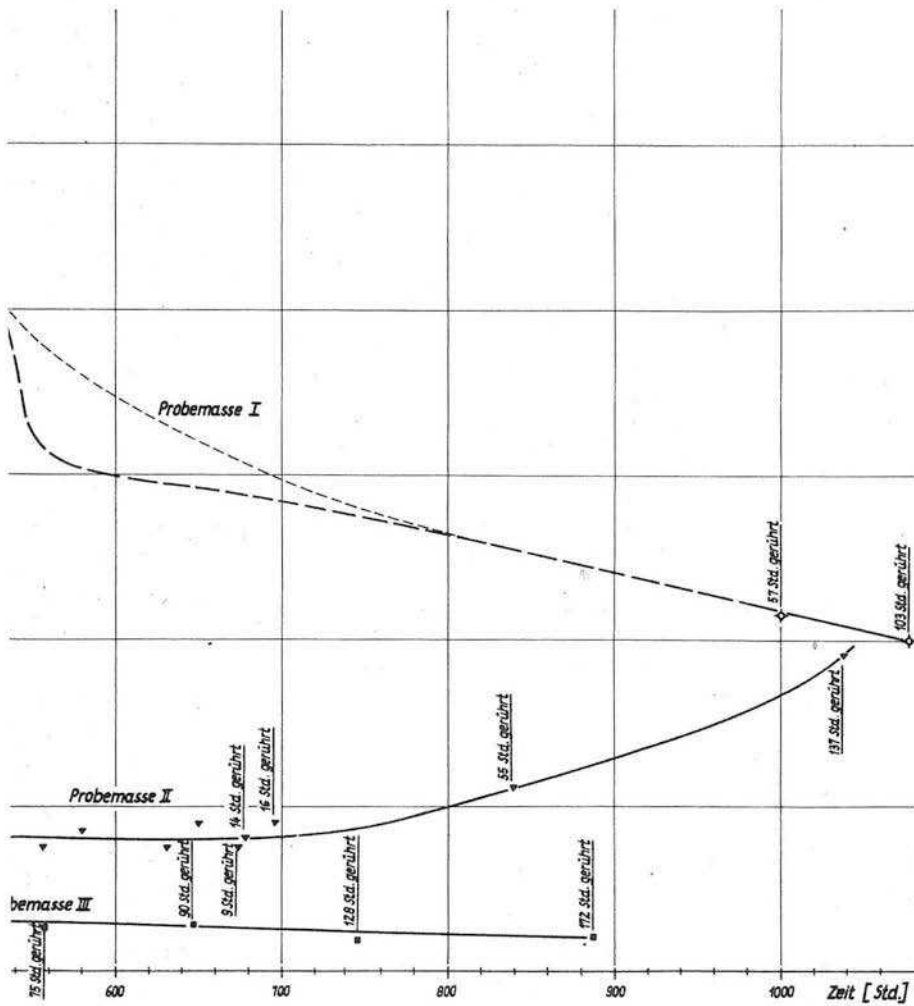
Abb.2
Phenolgehalt im Versuchsbehälter in Abhängigkeit von der Zeit



Signaturen:

- stehendes Wasser über der Böschung
- stehendes Wasser am Kastenende
- △ bewegtes Wasser über der Böschung
- ◆ bewegtes Wasser am Kastenende

Wassertemperatur 10 °C



Probemasse II

Probemasse III

stehendes Wasser
bewegtes Wasser
Wassertemperatur 21°C

□ stehendes Wasser
■ bewegtes Wasser
Wassertemperatur 10°C

Inhaltsverzeichnis der bisher erschienenen Hefte

<u>Heft 1</u> <u>1961</u>	ZSCHIESCHE, O.	Geschiebeversuche mit Korndurchmessern über 3 mm
	BLAU, E.	Neuzeitliche Meßverfahren zur laufenden Überwachung der Flußsohle
	GLAZIK, G.	Beitrag zur Frage der Standardisierung von Uferbefestigungen für Binnenwasserstraßen
	ROESCHMANN, F.	Geoelektrische Messungen an einem Lehmvorkommen
	OMANN, J.	Nachruf für Obering. Otto Zschiesche
<u>Heft 2</u> <u>1962</u>	BLAU, E.	Die Energieumwandlung von Tosbecken und in Druckleitungen
	GLAZIK, G.	Theoretische und modellmäßige Untersuchungen über die Wechselbeziehungen zwischen Seeschiff und Seekanal
<u>Heft 3</u> <u>1962</u>	MARTIN, H.	Beitrag zum Problem des Scherwiderstandes toniger Erdstoffe
<u>Heft 4</u> <u>1962</u>	OMANN, J.	Einiges über die Bedeutung und den Ablauf der 7. wissenschaftlichen Fachtagung der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau
	FUEHRER, M.	Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Wellen in Abhängigkeit vom Kanalprofil
	GLAZIK, G.	Theoretische und modellmäßige Untersuchungen über die Wechselbeziehungen zwischen Seeschiff und Seekanal
	JOHNSEN, R.	Unruhe im Hafen
	BLAU, E.	Der Einfluß der Strömung und des fahrenden Schiffes auf die Kanalsohle und Böschungen
	PLEHM, H.	Möglichkeiten der Mechanisierung beim Staudamm- und Kanalbau in der DDR
	SEIFERT, H.	Einige Erkenntnisse aus der technisch-wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit sowjetischen Instituten für Erd- und Grundbau
	BICZOK, I.	Wirtschaftliche Gründungen auf wenig tragfähigen Böden
	HEIDRICH, W.	Die Baugrunduntersuchung für dynamisch angeregte Fundamente auf rolligem Untergrund

- Heft 5
1962
- BLAU, E. Abfluß in zusammengesetzten Flußquerschnitten und in Krümmungen
- GLAZIK, G. Querströmungen in Schleusenvorhöfen und Maßnahmen zu ihrer Beseitigung
- Heft 6
1962
- JUST, H. Zum Problem der Einrüttelempfindlichkeit rolliger Erdstoffe
- SCHAFFNER, H.-J. Umlagerung rolliger Erdstoffe durch Vibration
- HEIDRICH, W. Die Bewegung eines Systems von zwei federnd gekoppelten und vertikal übereinanderliegenden Massen, von denen die untere mit kreisförmiger Grundfläche auf dem Boden liegt, bei vertikaler periodischer Erregung unter Berücksichtigung einer geschwindigkeits-proportionalen Dämpfung zwischen den beiden Massen
- HEIDRICH, W. Die Messung der Geschwindigkeit elastischer Wellen in Betonfundamenten zur Überprüfung der Baugüte
- SCHAFFNER, H.-J. Verdichtungskontrolle eines Steinschüttungsdammes mit verschiedenen Verfahren
- BORRMANN, H.-G. Bemerkungen zum Übergangswiderstand bei geoelektrischen Messungen
- ROESCHMANN, F. Versuche mit Stab- und Platten-Elektroden für geoelektrische Messungen
- Heft 7
1963
- BLAU, E. Der Abfluß und die hydraulische Energieumwandlung über einer parabelförmigen Wehrschwelle
- BLAU, E. Der Einfluß der Einlaufbauwerke auf die Geschiebebewegung und auf die Schifffahrt
- Heft 8
1963
- BLAU, E. Die Messung größerer Abflüsse im wasserbaulichen Versuchswesen
- FUEHRER, M. Der gegenwärtige Entwicklungsstand der Mikroflügel und ihr Einsatz im wasserbaulichen Versuchswesen sowie in der praktischen Hydrometrie
- KRAUSE, H. " Rilog "
Ein Gerät für die Messung kleinster Strömungsgeschwindigkeiten und ihrer Richtung bis in große Tiefen
- Heft 9
1963
- BLAU, E. Die Verbesserung des hydraulischen Wirkungsgrades von Diffusoren mit Rechteckprofil und großem Öffnungswinkel durch Einbau von Leitblechen oder von Kurzdifusoren
- MORGENSTERN, G.
- STRAUBE, Ch. Die Kolkbildung hinter unterströmten Wehren

- Heft 10
1964
- BLAU, E. Modellversuche zur Verbesserung der Abflußverhältnisse in Krümmungsstrecken bei schießendem Abfluß
- KEBELMANN, G. Verfahren zur Bemessung der Sammelkanäle von Hangüberfällen mit seitlicher Schußrinne
- Heft 11
1964
- OMANN, J. Einige Schwerpunkte der Arbeiten der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau auf dem Gebiete des wasserbaulichen - hydraulischen Modellversuchswesens sowie deren technisch-wissenschaftliche Bedeutung
- FUEHRER, M. Der Einfluß der örtlichen Strömungsverhältnisse in der Umgebung von Schiffen auf die Wechselbeziehungen zwischen Schiff und Kanal
- GLAZIK, G. Hydraulische Gesichtspunkte bei der Wahl von Uferbefestigungen für Binnenwasserstraßen
- RÖMISCH, K. Beitrag zu Fragen des hydraulischen Verhaltens dammbalkenartiger Körper bei unterschiedlicher Bintauchtiefe
- MORGNER, J. Schifffahrtsschleusen mit großen Fallhöhen
- Heft 12
1964
- OMANN, J. Kurze Darstellung über die Bedeutung der im Jahre 1962 bis 1964 durchgeführten Forschungsaufgaben der Abteilung Grundbau
- MARTIN, H. Die Scherfestigkeit toniger Erdschichten bei schneller Belastung
- SEIFFERT, H. Beitrag zur Bestimmung der Sohldruckverteilung
- LINDE, G. Baugrunderkundung durch Drucksondierungen. Geräte, Ergebnisse und Auswertungen
- WENDT, D. Dichtemessungen an Erdstoffen mit Gammastrahlensonden im Erd- und Grundbau
- HEIDRICH, W. Die Berechnung der Vertikalamplituden elastischer Wellen in der Nähe einer kreisförmigen Schwingungsquelle im ideal elastischen Medium
- PALLOKS, W. Die Messung der Ausbreitung elastischer Wellen im Boden in der Umgebung einer sinusförmig arbeitenden Schwingungsquelle mit kreisförmiger Grundplatte
- SCHÄFFNER, H.-J. Ein Verfahren zur Berechnung dynamisch erzeugter Setzungen in Kornhaufwerken
- Heft 13
1964
- HEIDRICH, W. Einige Ergebnisse von Messungen der Bodenschwingungen bei Rüttelverdichtung

Fortsetzung des Inhaltes des Heftes 13:

- SCHÄFFNER, H.-J. Zur Erfassung des Einflusses von Ungleichförmigkeitsgrad und Kornverteilungskennziffer auf die Lagerungsdichte von Kornhaufwerken
- SCHÄFFNER, H.-J. Zeitlicher Verlauf und Klassifizierung dynamischer Verdichtungsvorgänge im Hinblick auf bodenmechanische und baupraktische Probleme
- SCHÄFFNER, H.-J. Zur Problematik des Vergleichs statisch und dynamisch ermittelter Elastizitätsparameter körniger Materialien
- JUST, H. Die Deutung von Laufzeitkurven für drei Schichten bei einer langsamen Zwischenschicht
- BORRMANN, H.-G. Über eine trapezförmige Elektroden-Sonden-Anordnung
- HEIDRICH, W. Die Durchführung der Berechnung der Bewegungen eines Schwingwegmessers auf einem elastischen Halbraum bei Anregung durch ein harmonisches Wellenfeld

Heft 14
1965

- WENDT, D. Zulässige Belastung von Flachgründungen unter Berücksichtigung plastischer und elastischer Verformungen des Untergrundes (Verdrückungstheorie)
- PLEHM, H. Ruhedruckversuche mit sandigen und kiesigen Erdstoffen
- BECHER, G. Der Einfluß des Kalkgehaltes von Erdstoffen auf ihre Wasserdurchlässigkeit

Heft 15
1965

- SCHÄFFNER, H.-J. Abnahme des Böschungswinkels und Setzungen von Kornhaufwerken bei dynamischer Anregung in Abhängigkeit von den Korn- und Gefügeeigenschaften

Heft 16
1966

- GLAZIK, G. Seebau und Seebauforschung in der Sowjetunion
- JOHNSSEN, R.
SCHINKE, H. Einfluß der Wellenriffel auf die Sedimentbewegung